



RAPPORT FINAL : PROJET ICEPAC

UN ATLAS INTERACTIF SUR LA PROBABILITÉ DE L'ALÉA GLACE À L'ÉCHELLE DES
INFRASTRUCTURES MARITIMES ET CÔTIÈRES DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES

M. Bernier, C. Gignac, K. Chokmani, J. Poulin et Y. Gauthier

15/02/2016

Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement

No° de rapport INRS :

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Responsable de projet	Monique Bernier, Ph.D. INRS-ETE
Étudiant au Ph.D. en sciences de l'eau	Charles Gignac, M.Sc. INRS-ETE
Professionnels	Yves Gauthier, M.Sc. INRS-ETE
	Jimmy Poulin, M.Sc. INRS-ETE
Comité scientifique	Karem Chokmani, Ph.D. INRS-ETE
	Jean-Pierre Savard, M.Sc. OURANOS
	Christian Poirier, M.Sc., Ing. Transports Québec
	Anick Guimond, M.Sc. Transports Québec
Stagiaires	M. Étienne Nadeau INRS-ETE
	M. David Abraham INRS-ETE
	M. Charles Authier INRS-ETE



TABLE DES MATIERES

Équipe de travail.....	3
1. Introduction.....	9
a. Problématique.....	9
b. Objectifs du projet.....	10
c. Territoire étudié	12
2. Méthodologie	13
a. Modélisation fréquentielle des concentrations de glace de mer à 12.5km (Modèle IcePAC-R).....	13
i. Données utilisées.....	13
ii. Traitements réalisés.....	13
b. Cartographie à 250m de la présence de glace de mer	15
i. Données utilisées.....	15
ii. Traitements réalisés.....	17
c. Modélisation fréquentielle de la présence de glace de mer à l'échelle locale (Modèle IcePAC-L)	17
i. Données utilisées.....	17
ii. Traitements réalisés.....	18
d. Développement d'un atlas en ligne	19
i. Données utilisées.....	19
ii. Traitements réalisés.....	19
e. Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces de mer	20
i. Données utilisées.....	20
ii. Traitements réalisés.....	21
3. Résultats et discussion	23
a. Modélisation fréquentielle des concentrations de glace de mer à 12.5km (Modèle IcePAC-R).....	23
B. Cartographie à 250m de la présence de glace de mer	27
c. Modélisation fréquentielle de la présence de glace de mer à 250m (Modèle IcePAC-L) 30	
d. Développement d'un atlas en ligne	31
e. Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces de mer	33
Conclusion.....	35
Références	37
ANNEXE A: QUESTIONS DU SONDAGE	41
ANNEXE B: RÉPONSES AU SONDAGE	45
ANNEXE C: GUIDE DE L'USAGER POUR L'INTERFACE ICEPAC	53

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Région à l'étude dans le projet IcePAC	12
Figure 2: Synthèse de la modélisation fréquentielle pour un pixel avec tendance retirée via une fonction LOGIT et modélisé avec la distribution théorique beta a deux parametres (Le symbole * vis-à-vis du test indique que ce dernier a été passé avec succès suite au retrait de la tendance mesurée).....	14
Figure 3: Composé couleurs réelles MODIS-Terra de la côte ouest du Nunavik du 5/6/2012... 16	
Figure 4: "Flowchart" de l'algorithme IceMAP250	18
Figure 5: Logique de la modélisation binomiale locale : Une série temporelle indiquant la présence/absence de glace et compilée et ajustée à la distribution binomiale, permettant de modéliser la probabilité d'occurrence de glace pour chacun des pixels du domaine.....	19
Figure 6: Interface de l'atlas IcePAC (2016-02-01).....	20
Tableau 1 : Modèles, expériences, périodes + Fréquences, Résolutions spatiales et Ensembles des modélisations climatiques utilisées.....	21
Figure 7: Graphiques informatifs sur un pixel de type ICE.....	24
Figure 8: Graphiques informatifs sur un pixel de type MIZ.....	25
Figure 9: Graphiques informatifs sur un pixel de type OW.....	25
Figure 10: Résultat de la requête « Quelle est la probabilité d'observer une concentration de glace de 75% ou moins lors de la dernière semaine de Décembre ? » pour le modèle GTR....	26
Figure 11: Principe derrière la création de la carte composite	27
Figure 12: Exemple de carte synthèse hebdomadaire pour la semaine #11,12-18 mars 2003 .27	
Figure 13 : Comparaisons de l'état estimé des glaces par IceMap250 et les cartes du Service Canadien des glaces (Gauche) et les cartes OSI-409 (Droite)	28
Tableau 2 : Résultats des validations réalisées sur les différents produits d'IceMap250 en fonction des grandes périodes de la dynamique glacielle.....	28
Figure 14: Pourcentage d'occurrence De zone libre de nuages dans la région de la Baie d'Hudson, compilée sur l'année 2003 (PLUS FRÉQUENTE EST LA PRESENCE DE NUAGES, PLUS la couleur tendra vers le VERT foncé).	30
Figure 15: Modélisation locale de la probabilité de présence de glace pour la première semaine de l'année selon trois scénarios (25, 50 et 75%)	31
Figure 16: Interface de l'atlas IcePAC présentant la simulation GTR pour la requete : Concentration probable a 60% pour la semaine 24 (2 ^e semaine de JUIN).....	32
Figure 17 : Degrés-jours de gel (Sous -1.8°C) et Épaisseurs simulées [Lebedev, 1938] à Umiujaq (2011-2012).....	33
Figure 18: Concentration probable à 70% pour la semaine #1 en 2030 (Selon la tendance)....	34
Figure 19: Durée des saisons d'englacement (>15%) dans la Baie d'HUDSON en fonction du modèle CanRCM4 RCP85 pour les années 2020, 2050, 2075 et 2100.....	34



1. INTRODUCTION

a. Problématique

La présence de la glace de mer dans les eaux nordiques est d'importance capitale pour la protection des côtes, pour les communautés, le climat et les activités économiques.

En ce qui a trait à la protection des côtes et des infrastructures maritimes, la glace de rive diminue la vulnérabilité aux pressions externes de la glace et du vent [Ogorodov, 2003]. Le déclin de la couverture de glace et de sa durée a un impact direct sur la surface disponible au vent, le fetch, ce qui peut laisser présager des vagues plus fortes ayant des effets directs sur l'érosion côtière. Les sarrasins ou floes de glace en dérive représentent également un risque pour les côtes lorsque ces dernières ne sont plus protégées par la glace de rive. Pour les communautés côtières, particulièrement les communautés autochtones, le couvert de glace de mer est utilisé de manière quasi-journalière dans le cadre des déplacements entre les communautés ou pour les activités de chasse ou de pêche. Le peuple inuit, nomade, avec ses activités traditionnelles reposant énormément sur le mouvement et la connaissance du territoire, identifie l'océan arctique comme une « autoroute » et ce, qu'elle soit ou non glacée [Krupnik et al., 2010]. La situation précaire des glaces et le danger en découlant devient complexe à gérer pour ce peuple qui, depuis des centaines, voire des milliers d'années, fait appel à un savoir traditionnel transmis de génération en génération.

Au niveau du climat, la diminution de la superficie du couvert de glace marine [Stroeve et al., 2012] a un impact sur la rétroaction glace/albédo [Curry et al., 1995] qui explique en partie le phénomène d'amplification Arctique [Pithan and Mauritsen, 2014]. Le déclin de l'étendue couverte par la glace de mer implique également une exposition accrue des côtes aux phénomènes océaniques et atmosphériques comme les tempêtes et surcotes. Depuis 1978, on observe grâce aux satellites micro-ondes passives un déclin de la glace pluriannuelle au profit de la glace de première année qui ne survit pas à la fonte [Comiso, 2012]. La moyenne de la superficie couverte par les glaces lors du minimum de septembre présente un déclin d'un peu plus de 11% par décennie [Kwok and Untersteiner, 2011].

Finalement, l'activité économique de la région arctique est de facto liée à la dynamique des glaces et à son impact sur les transports maritimes. Une multitude de modélisations [L C Smith and Stephenson, 2013] démontrent que les grandes routes de transport du bassin arctique pourraient être libres de glace, lors du minimum de septembre, d'ici 2050. Des navires de classes OW (*Open water*), PC7 (*Polar Class 7*) et PC6 (*Polar Class 6*) pourraient alors emprunter le passage du Nord-Ouest librement. Également, depuis 1974, année d'implantation du NORDREG, le nombre d'escales des bateaux de croisières enregistrées dans la région arctique (au-delà du cercle polaire, 60°N) est en augmentation [Lasserre and Têtu, 2015].

Dans l'ensemble de ces domaines, des données de haute-résolution spatiale et temporelle sont un outil vers une meilleure compréhension et préparation face aux CC. Le succès des activités et des projets mis de l'avant dans la région arctique dépend, comme ailleurs, du niveau de préparation et de connaissances des décideurs et acteurs. Or, actuellement, peu de données à haute-résolution sont produites par les services nationaux de cartographie afin de permettre aux intervenants et chercheurs à faire face et de bien comprendre les changements induits par les CC sur le couvert glaciaire.

Il est pertinent pour les gestionnaires, ingénieurs, géomorphologues et navigateurs d'être aptes à quantifier les aléas liés au couvert de glace de manière à évaluer et minimiser les risques liés à l'usage, la construction et l'exploitation d'infrastructures côtières. Le besoin d'information précise deviendra de plus en plus d'actualité avec l'intensification escomptée des activités en Arctique et les besoins en infrastructures qui en découlera.

Dans la littérature, des études sur la variabilité temporelle de la glace de mer et sur les tendances liées aux changements climatiques ont été publiées [Cavalieri *et al.*, 2003; Johannessen *et al.*, 2004; Parkinson, 2000; Parkinson and Cavalieri, 2008]. Également, des analyses statistiques sur les valeurs centrales des distributions de concentrations de glace (moyenne, médiane), les valeurs extrêmes (étendue maximale et minimale) ainsi que les durées des saisons de glace sont fournies dans des produits comme l'Atlas des glaces du SCG [CIS, 2013]. Par contre, aucune information n'est fournie sur la nature de la distribution statistique des concentrations, leur probabilité d'occurrence et leur variabilité spatiale, particulièrement au niveau local.

Parmi les outils disponibles, les cartes du SCG sont probablement les plus utilisées, malgré qu'elles soient orientées principalement vers le milieu de la navigation. Les informations qui y sont données ne cadrent pas nécessairement avec les activités des ingénieurs et gestionnaires. Les autres outils, comme les modèles climatiques et physiques, quoique pertinents, proposent des résolutions spatiales ne permettant pas d'évaluer adéquatement les aléas et risques localement.

C'est dans ce contexte que le développement de méthodes et d'outils permettant l'étude des conditions de glace tant à l'échelle régionale (12.5km) qu'à l'échelle locale (250m) prend tout son sens.

b. Objectifs du projet

Pour répondre aux besoins présentés ci-dessous, l'objectif principal proposé dans le cadre du projet IcePAC est :

« Créer, grâce à de l'information historique sur le couvert de glace, un outil d'aide à la décision reposant sur des modélisations probabilistes régionales et locales de la

variabilité spatio-temporelle des conditions de glace prenant en compte l'impact des CC. »

Pour atteindre cet objectif principal, cinq objectifs spécifiques ont été abordés :

I. Étude de la variabilité spatio-temporelle du couvert de glace à l'échelle régionale (12.5km) afin d'établir les caractéristiques des distributions statistiques des concentrations de glace pour chaque maille dans la Baie et le détroit d'Hudson. (Modèle IcePAC-R)

I A : Acquisition et préparation des données

I B : Statistiques descriptives des données

I C : Application des tests IID.

I D : Modélisation fréquentielle des séries temporelles.

I E : Analyse et représentation des résultats sous forme cartographique.

II. Développement des procédures de cartographie automatisée de la présence de glace à l'échelle locale (250m) à partir d'imagerie optique afin de constituer une base de données historique des conditions de glace.

II C : Cartographie MODIS 250m

II D : Validation des approches

II E : Application des approches sur l'ensemble du jeu de données

III. Étude de la variabilité spatio-temporelle du couvert de glace à l'échelle locale (250m) à proximité des communautés de Quaqaq et d'Umiujaq afin d'établir les caractéristiques des distributions statistiques de présence de glace pour chaque maille. (Modèle IcePAC-L)

III A : Préparation et normalisation des données historiques locales

III B : Calcul des paramètres de distribution ajustés aux données à 250m.

III C : Production des résultats pour les communautés côtières.

IV. Mise en place d'un outil d'aide à la décision en ligne sous la forme d'un atlas interactif des conditions de glace.

IV A : Sélection des descripteurs de l'aléa

IV B : Programmation de scripts

IV C : Programmation de l'interface web.

IV D : Tests de fonctionnalité de l'outil

IV E : Mise en ligne.

IV F : Rédaction du guide de l'utilisateur.

IV G : Atelier de formation.

V. Étude de l'impact des CC sur les conditions de glaces de mer en lien avec la gestion des risques aux infrastructures maritimes.

V A : Obtention des projections climatiques 2050+.

V B : Mise à jour des caractéristiques des distributions pour le climat futur.

V C : Mettre à jour et analyser les descripteurs de l'aléa glace.

c. Territoire étudié

Le territoire couvert par l'étude statistique de la variabilité spatiotemporelle, par la mise en place de l'Atlas et par les processus de cartographie automatisée couvre le complexe de la Baie d'Hudson (Figure 1).



FIGURE 1: RÉGION À L'ÉTUDE DANS LE PROJET ICEPAC

2. MÉTHODOLOGIE

a. Modélisation fréquentielle des concentrations de glace de mer à 12.5km (Modèle IcePAC-R)

I. DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées pour constituer les séries temporelles proviennent du jeu de données «*OSI409: Global Sea Ice Concentration Reprocessing Dataset 1978-2014*» de l'EUMETSAT. Les cartes ont été produites et normalisées grâce aux algorithmes Bootstrap [Spren et al., 2005] et Bristol [D Smith, 1996]. Ces données sont prétraitées, moyennées sur une période hebdomadaire (Selon un calendrier de 365 jours) et transformées sous format GeoTIFF.

II. TRAITEMENTS RÉALISÉS

La première étape du processus de modélisation est la création des séries temporelles de concentration de glace. Puisqu'il est souhaité de modéliser la probabilité d'occurrence d'une concentration X pour une semaine S , les séries sont compilées en fonction de leur numéro de semaine dans l'année.

Une fois les séries compilées, ces dernières sont soumises aux tests IID, soit le test d'indépendance de Wald-Wolfowitz, le test d'homogénéité de Wilcoxon et le test de tendance de Mann-Kendall. Ces tests sont à prendre avec parcimonie, considérant le nombre de données peu élevé dans les séries (~32). Le seul test considéré comme critique dans le cadre de l'analyse des séries est le test de tendance (Mann-Kendall). Si une tendance est détectée dans la série temporelle, cette dernière est retirée via modélisation linéaire avec une fonction lien de type logit (Figure 2).

La détection de cycles dans les concentrations observées a été tentée dans le domaine fréquentiel, grâce à la *Fast Fourier Transform* et dans le domaine temporel grâce à l'autocorrélation. Or, encore une fois, la parcimonie s'impose étant donné le peu de données dans les séries.

La modélisation réalisée est obtenue par l'ajustement de la distribution bêta aux séries, distribution présentant une grande flexibilité de forme mais qui surtout répond au contexte de l'analyse en permettant la modélisation de données bornées [0,1]. Cette nuance est très importante car, contrairement à d'autres phénomènes modélisés, les concentrations sont contraintes entre 0 et 100%, donc entre 0 et 1.

Une fois la distribution bêta ajustée soit aux données, soit aux valeurs résiduelles, les distributions PDF et CDF sont obtenues. C'est grâce à ces distributions qu'il devient possible d'interroger le modèle pour demander par exemple : « *Quelle est la probabilité d'observer une concentration de 90% ou moins au pixel (X, Y) durant la première semaine de l'année ?* »

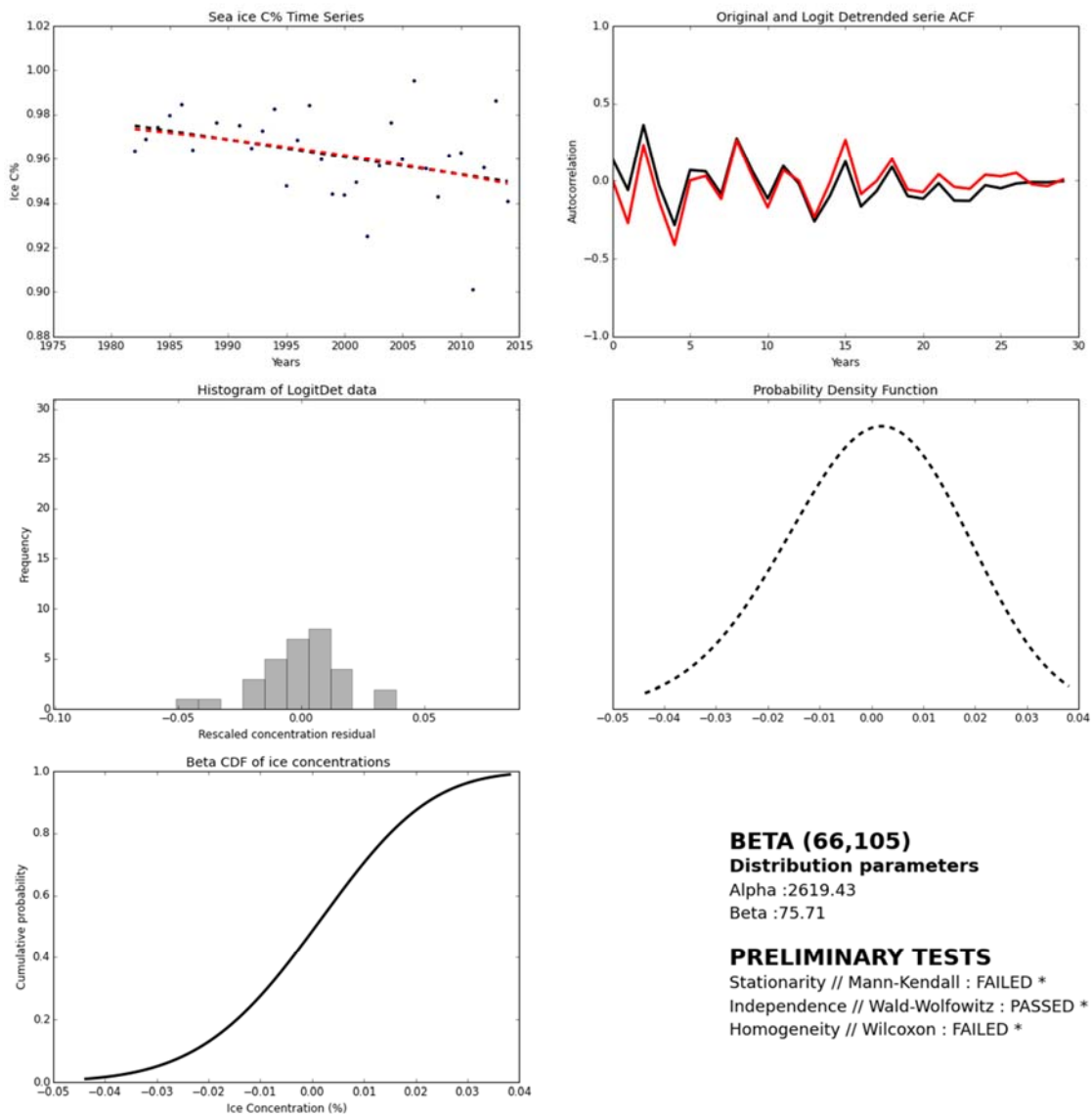


FIGURE 2: SYNTHÈSE DE LA MODÉLISATION FRÉQUENTIELLE POUR UN PIXEL AVEC TENDANCE RETIRÉE VIA UNE FONCTION LOGIT ET MODÉLISÉ AVEC LA DISTRIBUTION THÉORIQUE BETA A DEUX PARAMETRES (LE SYMBOLE * VIS-À-VIS DU TEST INDIQUE QUE CE DERNIER A ÉTÉ PASSÉ AVEC SUCCÈS SUITE AU RETRAIT DE LA TENDANCE MESURÉE)

Une série de variables informatives, comme le nombre de degrés-jours de gel cumulés, la simulation de l'épaisseur de glace via la formule empirique de

Lebedev [*Lebedev*, 1938] avec la modification proposée par Graystone [*Bilello*, 1961] et la durée des saisons de présence de glace est mesurée à partir de données de la réanalyse climatique ERA-Interim [*Simmons et al.*, 2007] et des données OSI-409.

b. Cartographie à 250m de la présence de glace de mer

I. DONNÉES UTILISÉES

L'approche de cartographie locale fait appel aux images des capteurs MODIS-Terra et MODIS-Aqua, respectivement opérationnels depuis 1999 et 2002. Ces deux capteurs fournissent des images sur 32 bandes spectrales à des résolutions variant de 250m à 1km (Figure 3). Dans le cadre de l'approche proposée, les bandes 2, 4, 20 et 32 sont utilisées. Les bandes 2 et 4 ayant une résolution spatiale de 500 m ont été désagrégées à 250m, grâce à l'algorithme de désagrégation spatiale proposé par le Centre Canadien de Télédétection [*Trishchenko et al.*, 2006]. Les bandes 20 et 32, ayant une résolution de 1km, sont quant à elles utilisées pour calculer un masque de « visibilité » qui permet de masquer les zones ennuagées. Un second masque de nuages, produit par la NASA, le MOD35 [*Ackerman et al.*, 1998], est aussi utilisé dans l'algorithme IceMAP250.



FIGURE 3: COMPOSÉ COULEURS RÉELLES MODIS-TERRA DE LA CÔTE OUEST DU NUNAVIK DU 5/6/2012

Originellement, les données de RADARSAT-1 et RADARSAT-2 (mode ScanSAR Narrow) acquises par le Service canadien des glaces et dont la résolution spatiale est de 50m devaient être utilisées afin de réaliser une cartographie de la glace des zones pour lesquelles les données MODIS ne pouvaient pas fournir d'information étant donné un couvert nuageux trop important. La réalisation de la cartographie avec les données RADARSAT aurait été réalisée à partir de l'approche développée par Gignac en 2012 [Gignac, 2012]. Il s'est avéré difficile d'automatiser le processus de traitement de ces données SAR car le protocole d'accès à la base de données contenant les images est restreignant. En fait, il nous est impossible, avec la configuration actuelle du serveur de données, de télécharger l'ensemble de l'imagerie disponible, il nous faudrait procéder avec le téléchargement d'une image à la fois. Considérant cela, il a été stratégiquement décidé, afin de compléter la version initiale de l'Atlas en mars 2016, que la cartographie utilisant le RADAR sera reportée dans une prochaine phase de développement de l'Atlas.

II. TRAITEMENTS RÉALISÉS

L'algorithme proposé, nommé IceMAP250 (Figure 4), est basée sur l'application de ratio et de seuils sur les données afin d'identifier si la glace est présente à la surface, tout comme l'algorithme IceMAP [Hall et al., 2001] qui en a servi d'inspiration. Un seuil sur le ratio spectral NDSII-2 [Keshri et al., 2008], innovation sous IceMAP250, permet de distinguer la glace de l'eau. Un second seuil, de 17% sur les réflectances en bande 4 [Riggs et al., 2001], est utilisé pour confirmer la décision liée au NDSII-2. L'utilisation combinée de deux masques de nuages différents, l'un très conservateur et prudent (MOD35) utilisé pour détecter avec certitude la glace et l'autre plus permissif utilisé pour détecter l'eau permet la création d'une carte composite qui surpasse en performance les cartes régulières.

c. Modélisation fréquentielle de la présence de glace de mer à l'échelle locale (Modèle IcePAC-L)

I. DONNÉES UTILISÉES

La modélisation fréquentielle de la présence de glace de mer à l'échelle locale repose sur l'étude des séries temporelles construites avec les cartes de glace de l'algorithme IceMap. Considérant le fait que les observations de l'état des glaces, que ce soit dû au couvert nuageux ou à une défectuosité du satellite MODIS, les données microondes passives OSI-409 (objectif 1) ont été utilisées comme complément pour renforcer les séries et pour guider l'estimation des paramètres de distribution.

La logique proposée est d'utiliser les données provenant de la haute-résolution de MODIS lorsque disponibles et le cas contraire, de combler les vides grâce aux données provenant des cartes OSI-409, ré-échantillonnées à une résolution spatiale de 250m. Une fois ces données combinées en un seul vecteur d'information.

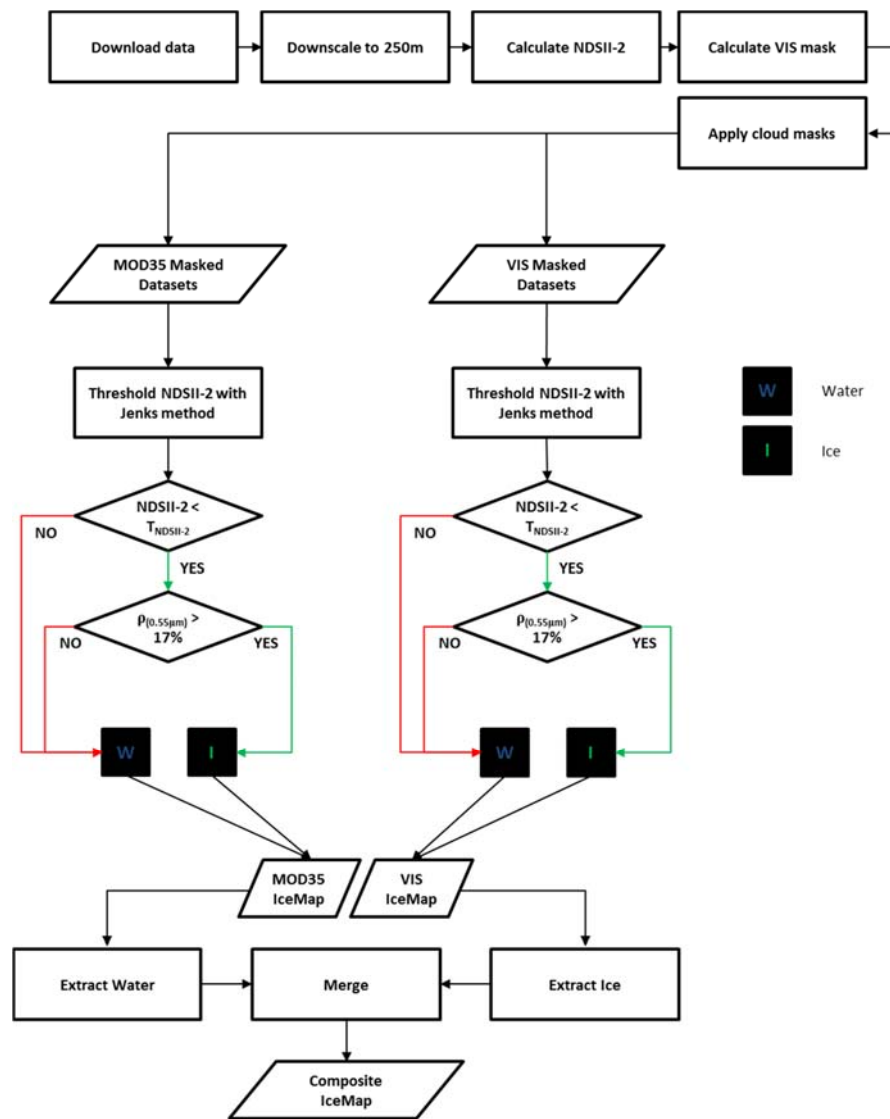


FIGURE 4: "FLOWCHART" DE L'ALGORITHME ICEMAP250

II. TRAITEMENTS RÉALISÉS

Puisque la cartographie provenant d'IceMAP250 offre une bonne précision spatiale (250m) mais une information inconstante temporellement et qu'au contraire, les données OSI-409 offrent une bonne résolution temporelle (journalière) mais une résolution spatiale grossière, une approche combinant l'avantage de chacune des sources de données est utilisée.

L'approche proposée incorpore les données à l'échelle régionale comme connaissance complémentaire dans le processus d'estimation des paramètres à l'échelle locale. Considérant que les données d'IceMAP250 indiquent la présence ou l'absence de glace et que celles provenant d'OSI-409 sont des informations de concentrations, un seuil classique de 15% de concentration [Meier et al., 2015] est utilisé comme critère de présence/absence de glace sur le produit OSI-409.

Les cartes OSI-409 et MODIS sont ensuite échantillonnées grâce à une grille régulière au 250m qui constitue la grille du modèle local. C'est sur cette grille qu'est effectuée l'analyse fréquentielle sur une distribution binomiale, puisque les observations dénotent la présence ou l'absence de glace (Figure 5).

Un modèle à l'échelle locale de 250m est proposé pour chacune des communautés côtières de la Baie d'Hudson.

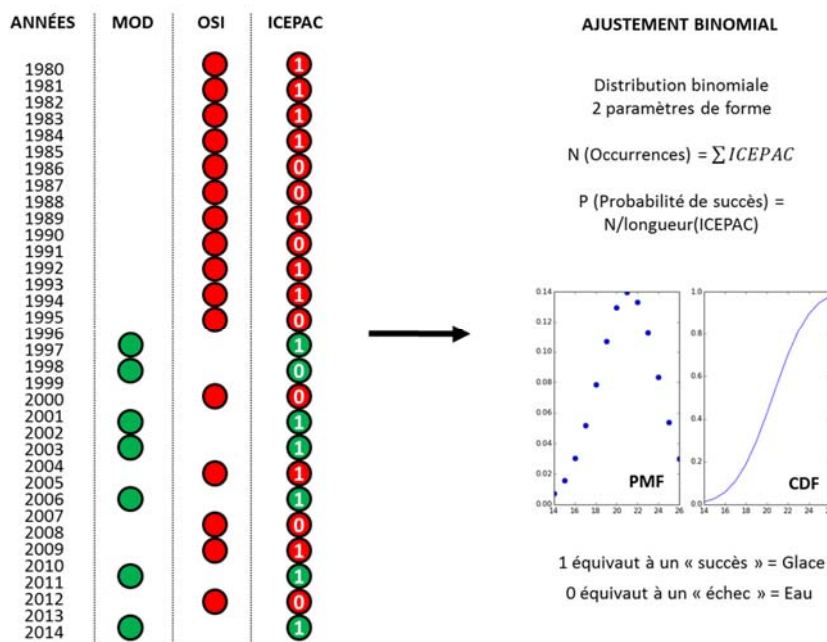


FIGURE 5: LOGIQUE DE LA MODÉLISATION BINOMIALE LOCALE : UNE SÉRIE TEMPORELLE INDICANT LA PRÉSENCE/ABSENCE DE GLACE ET COMPILÉE ET AJUSTÉE À LA DISTRIBUTION BINOMIALE, PERMETTANT DE MODÉLISER LA PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DE GLACE POUR CHACUN DES PIXELS DU DOMAINE.

d. Développement d'un atlas en ligne

I. DONNÉES UTILISÉES

Le développement de l'atlas en ligne a été guidé par les résultats d'un sondage effectué auprès d'intervenants du milieu maritime, de spécialistes en cartographie des glaces, en écologie nordique, en ingénierie et en transports à l'automne 2015. L'Annexe 1 présente le questionnaire. L'Annexe 2 résume les résultats obtenus.

II. TRAITEMENTS RÉALISÉS

La création de l'interface web de l'atlas demeurera en évolution constante après la fin de ce projet (mars 2016) et l'interface est hébergé à l'adresse suivante : <http://icepac.ete.inrs.ca> (Figure 6).

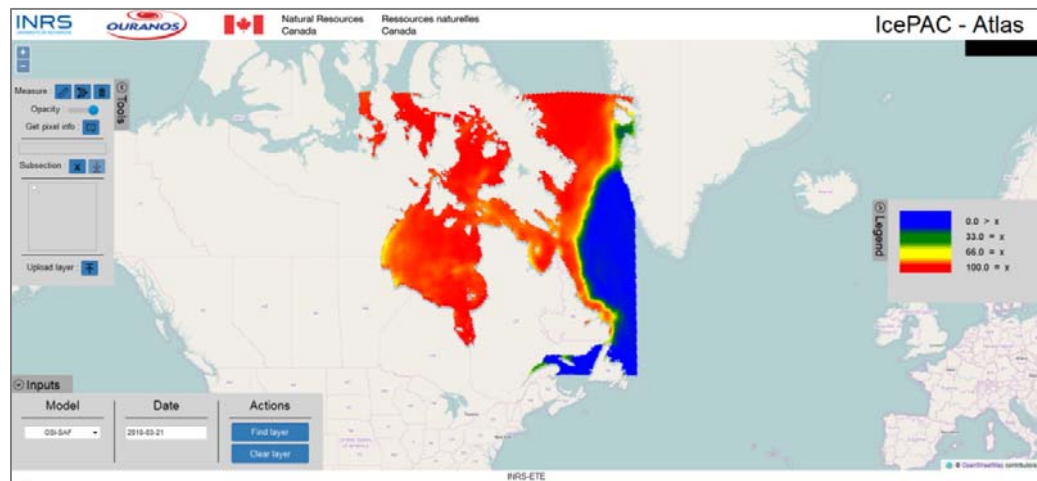


FIGURE 6: INTERFACE DE L'ATLAS ICEPAC (2016-02-01)

Elle est développée depuis septembre 2015 sous la plateforme MapServer en synergie avec un serveur de données géospatiales sous la plateforme GeoServer. Les données y sont intégrées de manière continue depuis le mois de décembre 2015; d'abord les données de cartographie au 12.5km de 1978 à 2014, ensuite les résultats des modélisations IcePAC régionales et locales puis finalement les cartes de présence de glace générées grâce à ICEMAP250 (images MODIS). Une série d'indicateurs sont en cours de développement et de calcul et seront, au fur et à mesure de leur complétion, intégrés à GeoServer et donc à l'interface.

e. Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces de mer

I. DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées pour l'étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces de la Baie d'Hudson proviennent d'une collection de simulations climatiques tirées de deux modèles, pour lesquelles une variable de concentration de glace (identifiable par l'acronyme « sic ») est disponible.

Parmi ces modèles (Tableau 1), le Modèle Régional Canadien du Climat 4 [Caya and Laprise, 1999], piloté par le *Canadian Earth System Model 2* (CanESM2) sous les expériences RCP 4.5 et 8.5 ensemble r1i1p1, et puis le *Community Climate System Model 4* (CCSM4) [Gent et al., 2011] sous les expériences RCP 4.5 et 8.5, sous l'ensemble r6i1p1 qui s'est avéré être le seul qui fournit des données journalières. Les simulations sous RCP 2.6 ont volontairement été mises de côté compte tenu de la faible vraisemblance d'un tel scénario. Les numéros r*i*p* font référence à « *realisation, initialisation & physics* » [Moine et al., 2014].

Les données du CanRCM4 sont un produit du Centre Canadien de Modélisation et de l'analyse Climatique (CCmaC) et celles du CCSM4 du National Center for Atmospheric Research (NCAR). L'acquisition des données s'est faite via le site du CCmaC pour les données CanRCM4 et via le site de l'Earth System Grid Federation pour le CCSM4.

TABLEAU 1 : MODÈLES, EXPÉRIENCES, PÉRIODES + FRÉQUENCES, RÉOLUTIONS SPATIALES ET ENSEMBLES DES MODÉLISATIONS CLIMATIQUES UTILISÉES

Modèle	Expérience	Période + Fréquence	Résolution des simulations	Ensemble
CanRCM4	RCP4.5	2006-2100 (Journalier)	0.2° (Approx 25km)	r1i1p1
CanRCM4	RCP 8.5	2006-2100 (Journalier)	0.2° (Approx 25km)	r1i1p1
CCSM4	RCP 4.5	2006-2100 (Journalier)	0.9424° x 1.25°	r6i1p1
CCSM4	RCP 8.5	2006-2100 (Journalier)	0.9424° x 1.25°	r6i1p1

Les projections futures (2006-2100), forcées par les expériences RCP 4.5 et 8.5 suivent des trajectoires représentatives des concentrations en gaz à effet de serre, qui résultent approximativement en forçage radiatifs de respectivement 4.5 et 8.5 W/m² à l'année 2100, relativement aux conditions pré-industrielles [Vuuren *et al.*, 2011].

Notez que la modélisation via la procédure IcePAC est applicable à d'autres modèles, tant et aussi longtemps que ces derniers fournissent des données sur la concentration de glace. Le choix des modèles utilisés pour les tests ne repose pas sur des critères stricts.

II. TRAITEMENTS RÉALISÉS

Le processus de traitement débute par la création de séries temporelles des moyennes hebdomadaires de concentration de glace pour chacun des pixels de chacun des modèles et pour chacun des expériences RCP. Une fois les séries compilées, une approche d'analyse fréquentielle, en tout point semblable à celle utilisée avec le modèle IcePAC-R est appliquée.

Tout comme pour l'étude des conditions passées, une série de variables informatives, comme le nombre de degrés-jours de gel cumulés, la simulation de l'épaisseur de glace via la formule empirique de Lebedev et la durée des saisons d'englacement est mesurée. L'ensemble des modélisations fréquentielles et des graphiques informatifs seront mis à la disposition des usagers via l'Atlas IcePAC.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

a. Modélisation fréquentielle des concentrations de glace de mer à 12.5km (Modèle IcePAC-R)

Les modélisations provenant des données OSI-409 ont été réalisés dans 3 configurations, de manière en prendre en compte les risques inhérents à la longueur de nos séries, soit une valeur N d'au maximum 36.

La première se basait sur l'hypothèse que le nombre de données dans les séries temporelles était suffisamment élevé pour que les tests IID, dont fait partie le test de Mann-Kendall (REF) soit en mesure de détecter une tendance de manière adéquate. C'est cette configuration que nous avons nommée DTR (*Detected Trends Removal*).

La seconde hypothèse posée était de prétendre qu'en aucun cas, considérant la longueur des séries, une tendance significative pouvait être détectée. C'est l'hypothèse NTR (*No Trend Removed*).

La dernière hypothèse, inverse de la précédente, stipule que puisque les séries sont courtes, le test de Mann-Kendall n'arrive pas à détecter une tendance dans tous les cas, mais qu'en réalité, toutes les séries sont affectées par une tendance. Cette dernière configuration est nommée GTR (*Generalized Trend Removal*).

Les tests de simulation révèlent que c'est la simulation GTR qui semble fournir les résultats les plus cohérents et les plus réalistes. En effet, sous l'hypothèse du retrait des tendances détectées (DTR), un effet de bruit est généré dans la sortie du modèle, des points à valeur discordantes avec leur voisinage apparaissent dans la carte, signe que la simulation n'est pas réaliste. Il en est de même sous la simulation en configuration sans retrait de tendances (NTR). A la lumière de ces observations, l'ensemble des simulations ont été menées sous configuration GTR afin de maintenir une continuité dans les résultats simulés.

Trois cas types de dynamique glacielle ont été décelés lors des simulations :

- 1) Le pixel a forte concentration de glace (ICE), pour qui la fonction cumulative de probabilité (CDF) présente une forte croissance dans la portion droite du graphique, signe que la probabilité d'une concentration élevée est grande (Figure 7).
- 2) Le pixel en zone marginale de glace (MIZ), soit les pixels qui se retrouvent d'années en années, pour la semaine simulée, en marge de la banquise et qui voient leurs concentrations osciller, selon l'année, entre de faibles valeurs et de fortes valeurs. La fonction cumulative de probabilité (CDF) de ces pixels

tend à se rapprocher de la diagonale, une légère déformation de la courbe pouvant indiquer un poids plus marqué des valeurs de faibles ou de fortes concentrations dans l'estimation des paramètres de la distribution beta (Figure 8).

- 3) Le pixel en eau libre (OW), pour lequel, sauf exception, la fonction de densité de probabilité (CDF) tend fortement dans la moitié gauche du graphique, signe que les concentrations faibles sont plus probables pour ce pixel (Figure 9).

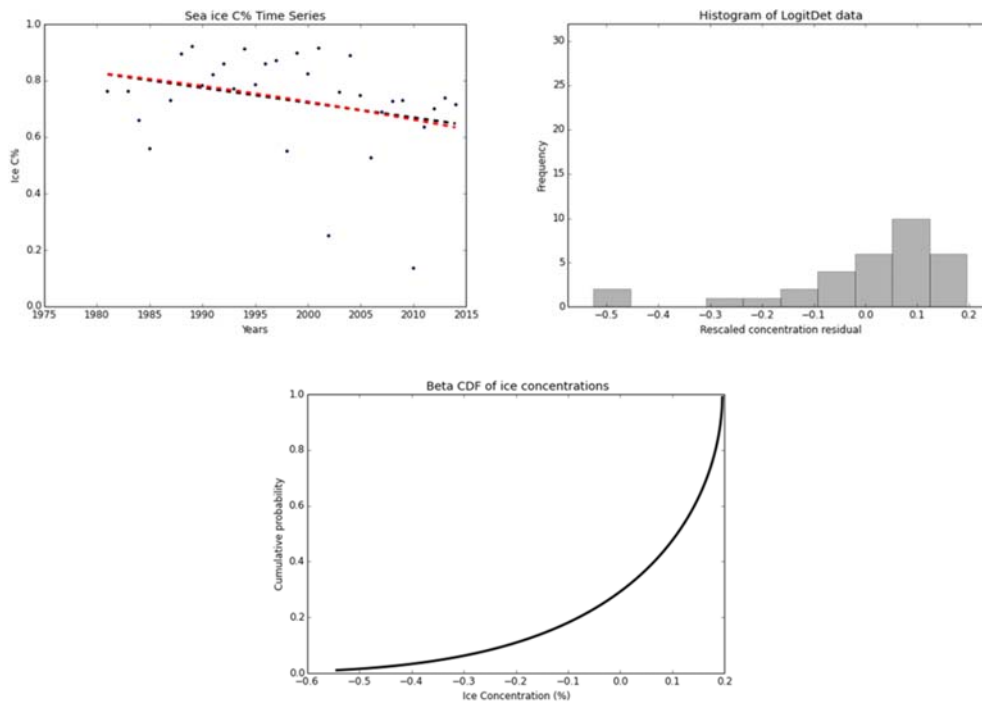


FIGURE 7: GRAPHIQUES INFORMATIFS SUR UN PIXEL DE TYPE ICE

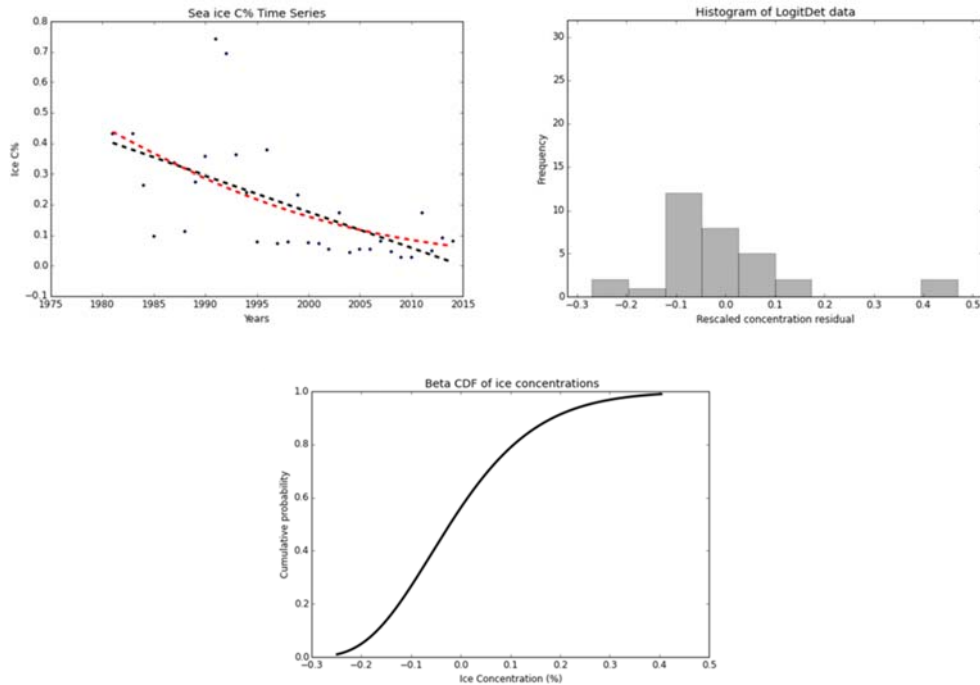


FIGURE 8: GRAPHIQUES INFORMATIFS SUR UN PIXEL DE TYPE MIZ

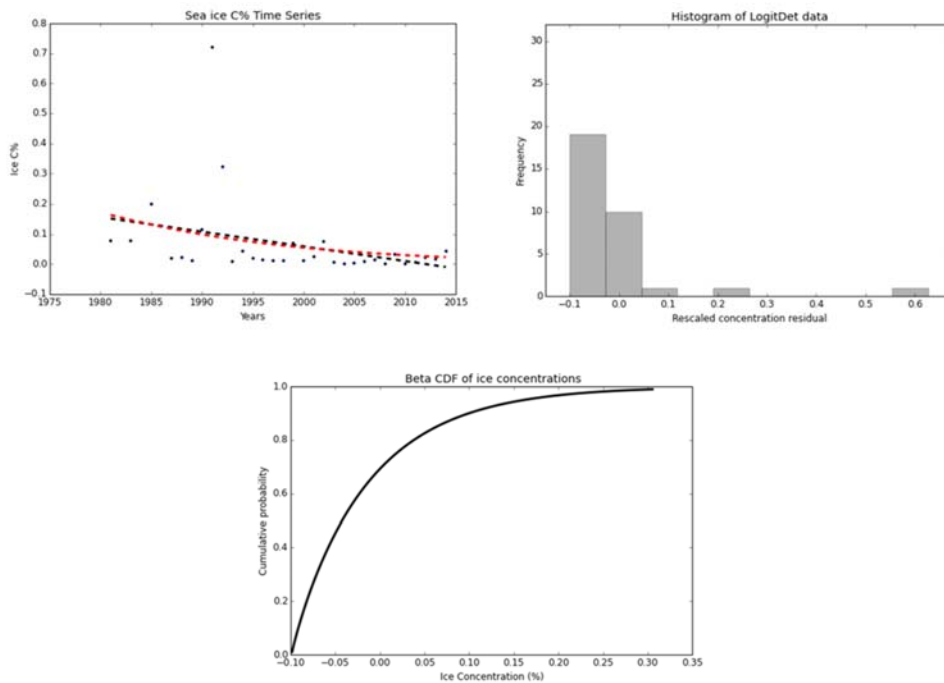


FIGURE 9: GRAPHIQUES INFORMATIFS SUR UN PIXEL DE TYPE OW

Dans tous les cas, il s'agit d'une dynamique relative à l'étendue des valeurs de concentration sur laquelle est mesurée la tendance car la distribution *Beta* est paramétrée en fonctions des valeurs résiduelles obtenues par rapport à la tendance mesurée.

Dans l'ensemble, les ajustements à la distribution beta se sont avérés précis, cela étant majoritairement dû à la grande flexibilité de forme de la distribution *Beta*. Également, considérant la restriction posée par la modélisation fréquentielle dans un domaine borné [0,1], soit les pourcentages, la distribution beta s'avérait la candidate idéale.

Puisque cette problématique du domaine borné s'appliquait également à la recherche de la tendance et qu'une simple tendance linéaire n'aurait pas pu convenir, une régression linéaire avec fonction de transfert *logit* a été utilisée. Cette nuance permet de s'assurer que la tendance ne puisse pas prévoir une valeur allant au-delà de 100 ou en-deca de 0% de concentration. Aucune saisonnalité ou cycle n'a été détecté dans les séries.

Les modèles obtenus sont ensuite utilisés pour générer des résultats liés à des requêtes particulières, par exemple :

« Quelle est la probabilité d'observer une concentration de glace de 75% ou moins lors de la dernière semaine de décembre ? »

Une fois soumise, la requête est traduite en paramètres et envoyée vers le code approprié ce qui nous permet de « spatialiser » les résultats pour l'ensemble de la Baie d'Hudson (Figure 10).

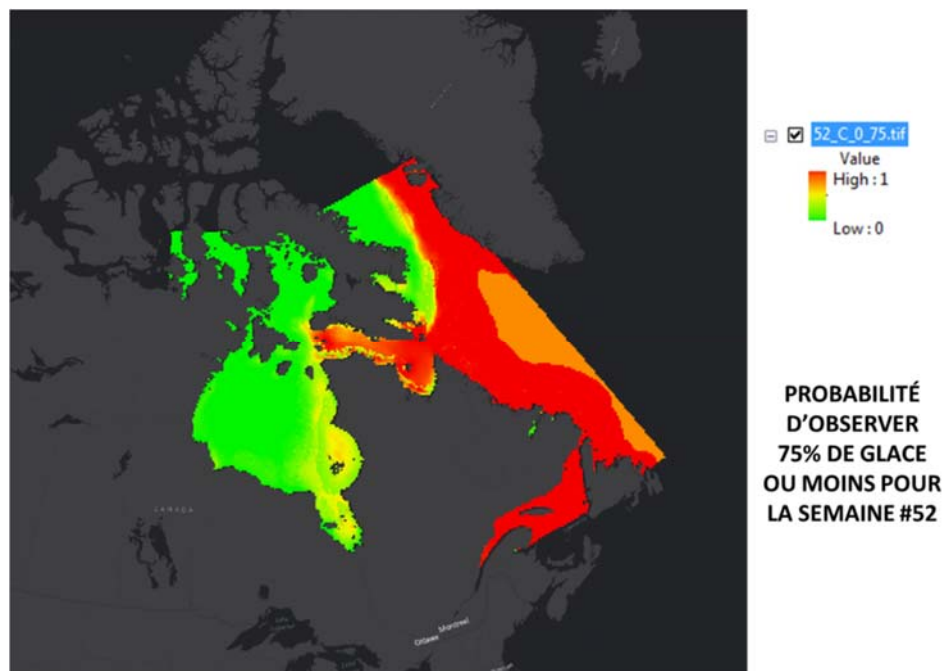


FIGURE 10: RÉSULTAT DE LA REQUÊTE « QUELLE EST LA PROBABILITÉ D'OBSERVER UNE CONCENTRATION DE GLACE DE 75% OU MOINS LORS DE LA DERNIÈRE SEMAINE DE DÉCEMBRE ? » POUR LE MODÈLE GTR.

B. Cartographie à 250m de la présence de glace de mer

L'algorithme IceMap250 génère 4 différents produits :

- 1) La carte de présence de glace basée sur le masque de nuage MOD35.
- 2) La carte de présence de glace basée sur le masque de visibilité VIS.
- 3) La carte composite (Figure 11), combinant l'information des cartes sous MOD35 et VIS.
- 4) La carte synthèse hebdomadaire (Figure 12), combinant les composites d'une même semaine.

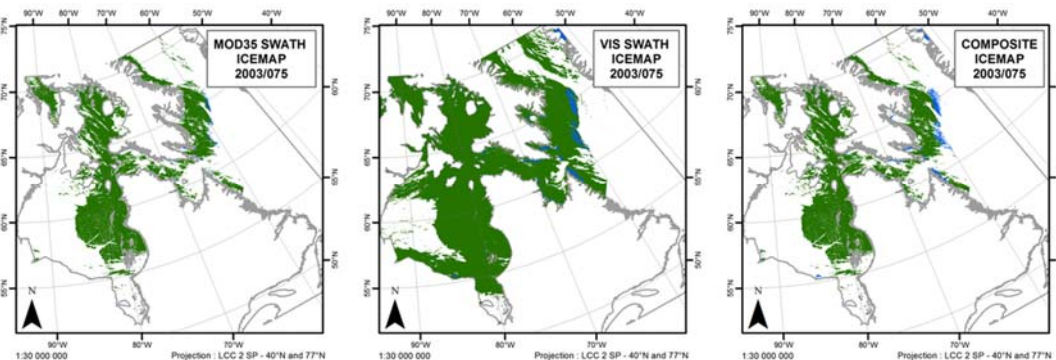


FIGURE 11: PRINCIPE DERRIÈRE LA CRÉATION DE LA CARTE COMPOSITE

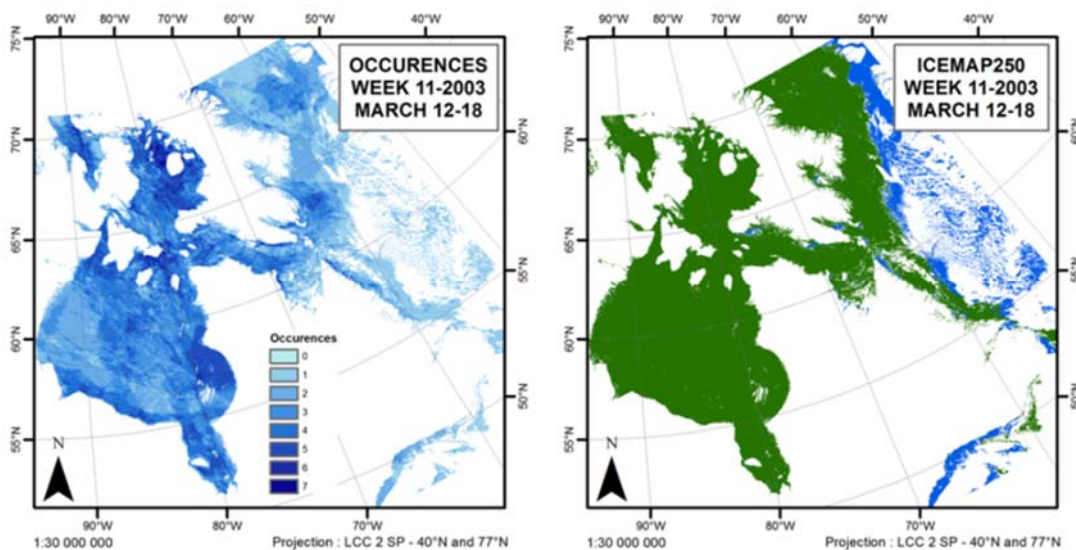


FIGURE 12: EXEMPLE DE CARTE SYNTHÈSE HEBDOMADAIRE POUR LA SEMAINE #11,12-18 MARS 2003

Pour chacun des produits, une validation a été réalisée (Tableau 2). Une validation quantitative a été effectuée dans le cas des cartes journalières MOD35, VIS et composites, puisque ces dernières sont les bases servant à la constitution du dernier produit, soit les cartes de synthèse hebdomadaires, ces dernières ayant été évaluées qualitativement par comparaison visuelle avec des produits de nature similaire (Figure 13).

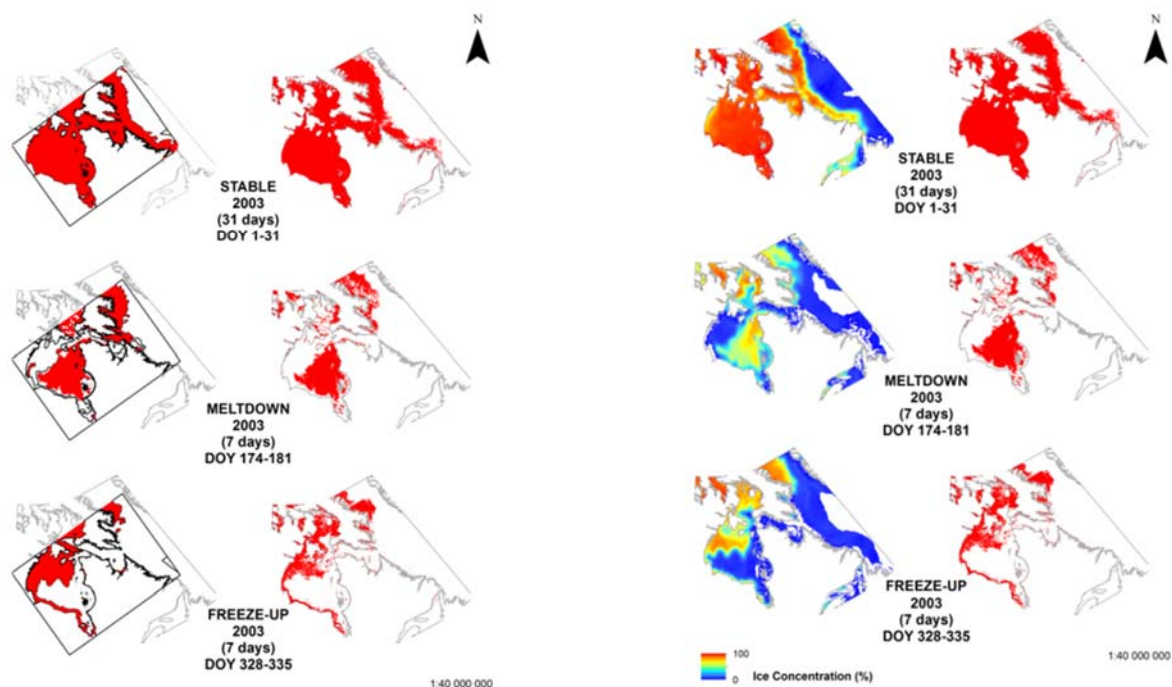


FIGURE 13 : COMPARAISONS DE L'ÉTAT ESTIMÉ DES GLACES PAR ICEMAP250 ET LES CARTES DU SERVICE CANADIEN DES GLACES (GAUCHE) ET LES CARTES OSI-409 (DROITE)

TABLEAU 2 : RÉSULTATS DES VALIDATIONS RÉALISÉES SUR LES DIFFÉRENTS PRODUITS D'ICEMAP250 EN FONCTION DES GRANDES PÉRIODES DE LA DYNAMIQUE GLACIERE

			INTEPRETATION DE COMPOSES-COULEUR 250M					
COUVERT STABLE			EAU	GLACE	TOTAL	COMM. ERREUR GLACE	COMM. ERREUR EAU	KAPPA
MOD29 (M35)	CLASSIFICATION	EAU	12	1	13	8%	1%	0,79
		GLACE	5	482	487			
		TOTAL	17	483	500			
IceMap1KM(M35)		EAU	10	0	10	0%	1%	0,73
		GLACE	7	483	490			
		TOTAL	17	483	500			
IceMap1KM(VIS)		EAU	10	0	10	0%	1%	0,73
		GLACE	7	483	490			
		TOTAL	17	483	500			
IceMap250 (VIS)	EAU	16	0	16	0%	0%	0,97	
	GLACE	1	483	484				
	TOTAL	17	483	500				
IceMap Composite	EAU	17	0	17	0%	0%	1,00	
	GLACE	0	483	483				
	TOTAL	17	483	500				
FONTE			EAU	GLACE	TOTAL	COMM. ERREUR GLACE	COMM. ERREUR EAU	KAPPA
MOD29 (M35)	CLASSIFICATION	EAU	197	1	198	1%	13%	0,83
		GLACE	40	262	302			
		TOTAL	237	263	500			
IceMap1KM(M35)		EAU	208	4	212	2%	10%	0,87
		GLACE	29	259	288			
		TOTAL	237	263	500			
IceMap1KM(VIS)		EAU	212	8	220	4%	9%	0,87
		GLACE	25	255	280			
		TOTAL	237	263	500			

		TOTAL	237	263	500			
IceMap250 (VIS)		EAU	234	24	258	9%	1%	<u>0,89</u>
		GLACE	3	239	242			
		TOTAL	237	263	500			
IceMap Composite		EAU	225	0	225	0%	4%	<u>0,95</u>
		GLACE	12	263	275			
		TOTAL	237	263	500			
ENGLACEMENT		EAU	GLACE	TOTAL	COMM. ERREUR GLACE	COMM. ERREUR EAU	KAPPA	
MOD29 (M35)		EAU	110	32	142	23%	5%	<u>0,74</u>
		GLACE	19	339	358			
		TOTAL	129	371	500			
IceMap1KM(M35)		EAU	115	38	153	25%	4%	<u>0,74</u>
		ICE	14	333	347			
		TOTAL	129	371	500			
IceMap1KM(VIS)	CLASSIFICATION	EAU	111	51	162	31%	5%	<u>0,67</u>
		GLACE	18	320	338			
		TOTAL	129	371	500			
IceMap250 (VIS)		EAU	116	25	141	18%	4%	<u>0,81</u>
		GLACE	13	346	359			
		TOTAL	129	371	500			
IceMap Composite		EAU	115	1	116	1%	4%	<u>0,92</u>
		GLACE	14	370	384			
		TOTAL	129	371	500			

Les résultats démontrent les apports positifs de la résolution spatiale augmentée, de l'utilisation du masque VIS et de l'approche de combinaison des cartes MOD35 et VIS. Le paramètre Kappa [Congalton, 1991], témoin de la qualité de la classification, est systématiquement entre une valeur de 0,92 (Englacement) et 1 (Couvert stable). Évidemment, la parcimonie est de mise car l'obtention d'une valeur de 1 est un fait rare et doit être interprétée comme une conjoncture particulière liée aux circonstances de la procédure de validation (date, données de validation, etc...). Toutefois, il est juste de conclure de l'excellente performance offerte par l'algorithme IceMap250.

Il est également possible, grâce aux deux masques, d'évaluer l'importance du couvert nuageux sur la région en compilant, pour chaque jour, les occurrences de couvert nuageux enregistrées. C'est cette analyse qui est présentée à la figure 14.

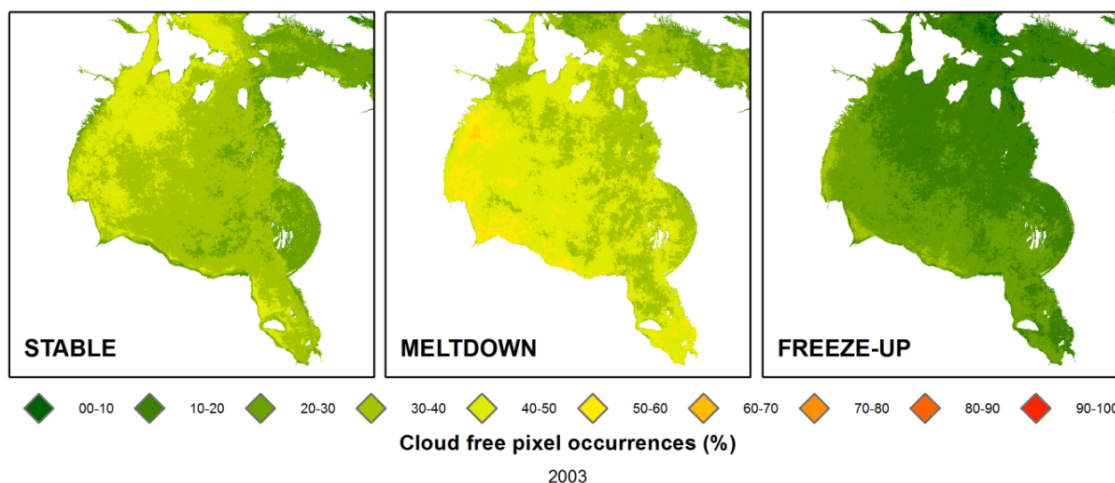


FIGURE 14: POURCENTAGE D'OCCURRENCE DE ZONE LIBRE DE NUAGES DANS LA RÉGION DE LA BAIE D'HUDSON, COMPILÉE SUR L'ANNÉE 2003 (PLUS FRÉQUENTE EST LA PRÉSENCE DE NUAGES, PLUS LA COULEUR TENDRA VERS LE VERT FONCÉ).

c. Modélisation fréquentielle de la présence de glace de mer à 250m (Modèle IcePAC-L)

La modélisation de la présence de glace de mer repose sur une combinaison des données provenant des cartes d'IceMap250 et des cartes d'OSI-409 lorsque des vides sont présents dans les données IceMap250.

L'impact de l'utilisation combinée des deux sources apporte évidemment, dû à la prépondérance des données OSI sur les données MODIS, à observer des patrons indiquant leur dominance sur l'estimation des paramètres. Or, de par sa nature évolutive (Génération automatique de nouvelles cartes MODIS), le système est voué, au fur et à mesure, à s'équilibrer et à intégrer l'information provenant de MODIS estompant du même coup la présence des patrons OSI.

La modélisation réalisée vise à prédire la probabilité d'occurrence de la présence de glace pour chaque semaine de l'année. Suite à la modélisation, qui est basée sur l'ajustement d'une distribution binomiale à deux paramètres (N et P) sur les données d'occurrence de glace, l'utilisateur peut poser des requêtes.

Une requête particulière pourrait être, par exemple :

« Quelle est la probabilité d'observer un englacement de 25%, 50% ou 75% pour la communauté côtière d'Umiujaq la première semaine de l'année (DOY 0-7) ? »

Une fois soumise, la requête est traduite en paramètres et envoyée vers le code approprié ce qui nous permet de « spatialiser » les résultats pour la communauté en question (Figure 15).

Comme le montre la Figure 15, un scénario peu probable (25%) présence des probabilités d'occurrence de glace entre 25% et 100% tandis que le scénario plus

probable (75%) indique que la probabilité de présence de glace est plus forte, entre 50 et 100%.

L'on peut donc en conclure qu'il est fort probable que le voisinage d'Umiujaq, pendant la première semaine de l'année (DOY 0-7), présente une probabilité supérieure à 50% d'être englacée. Notez que, même dans le scénario probable à seulement 25%, une bonne partie de la région présente une probabilité supérieure à 25% d'être englacée.

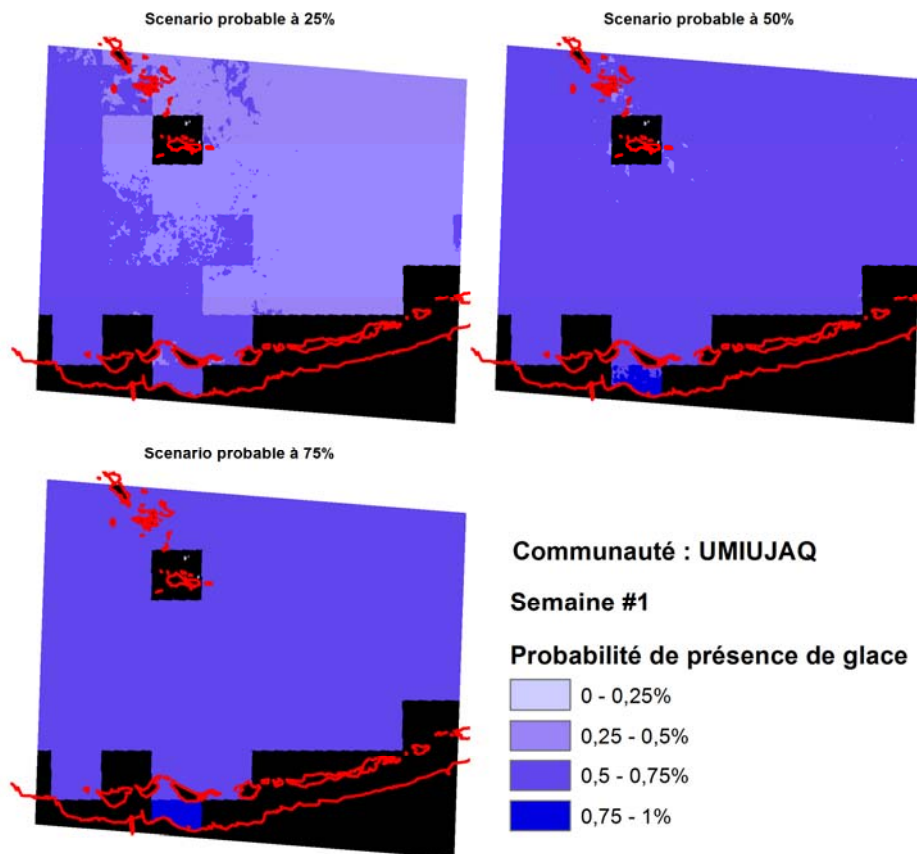


FIGURE 15: MODÉLISATION LOCALE DE LA PROBABILITÉ DE PRÉSENCE DE GLACE POUR LA PREMIÈRE SEMAINE DE L'ANNÉE SELON TROIS SCÉNARIOS (25, 50 ET 75%)

d. Développement d'un atlas en ligne

Cette étape débutée à l'automne 2015 se poursuivra de par la nature de l'outil proposé, l'atlas IcePAC, au-delà de la fin du projet. En date du 15 février 2016, l'interface (Figure 16) fournit à l'utilisateur, ayant accès sans restriction, la capacité de naviguer dans les banques de données générées lors du projet IcePAC (2013-2016).

Sous l'onglet *Tools*, l'interface offre des capacités d'analyse de base, comme le calcul de superficie, le calcul de distance et la gestion de l'opacité. Il est également possible pour l'utilisateur de soumettre sa propre information, considérant que l'information sera sujette à validation avant d'être rendue disponible.

Finalement, l'utilisateur pourra télécharger une région d'intérêt (ROI) de son choix en format GeoTIFF, ce dernier format étant une norme ad-hoc du marché géospatial au niveau de l'imagerie.

L'onglet *Legend*, spécifiquement conçu pour accueillir la légende de la couche d'information activée, est disponible dans la marge droite de l'interface. Cette dernière affiche la légende de la dernière couche ouverte par l'utilisateur.

Enfin, l'onglet *Inputs* donne accès à tous les produits de simulation, cartographie ou d'information générés dans le projet IcePAC. L'utilisateur pourra accéder aux produits en établissant sa requête, le cas échéant dépendant du produit, en fonction de la semaine ou de la journée de son choix et de la probabilité ou de la concentration de glace de son choix.

Dès mars 2016, l'utilisateur pourra interroger l'Atlas au niveau des données passées provenant d'OSI-409, des modélisations régionales à des pas de 5% (concentrations et probabilités), des modélisations locales (présence/absence) et au niveau des modélisations réalisées à partir des données futures, encore une fois à un pas de 5% (concentrations et probabilités). Une première version du guide de l'utilisateur est présentée à l'Annexe 3.

Au fur et à mesure qu'elles seront calculées, des informations auxiliaires comme, par exemple, les modélisations empiriques d'épaisseur de glace, la détection de fetch le long des côtes et les statistiques descriptives de chacun des jeux de données seront intégrées dans l'Atlas.

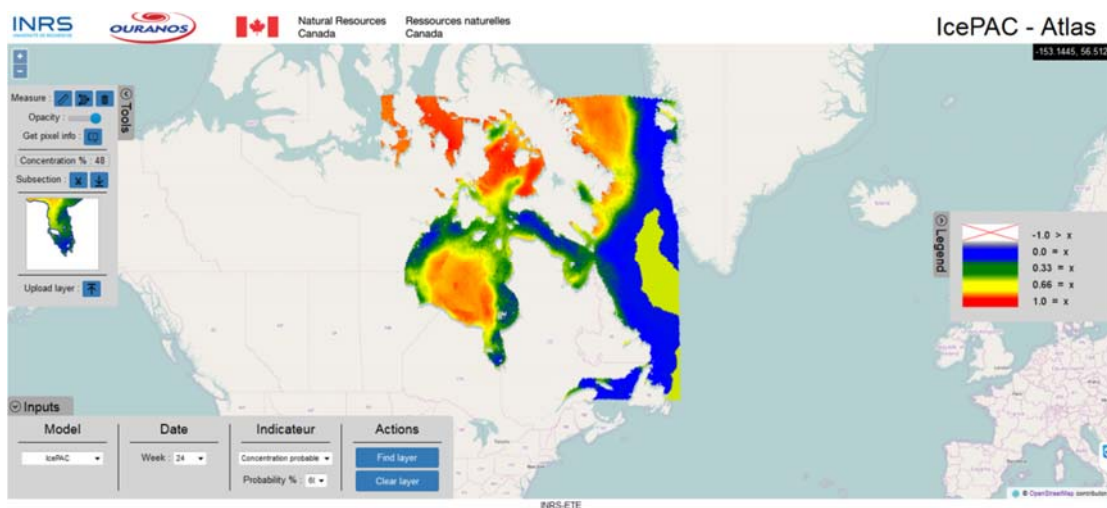


FIGURE 16: INTERFACE DE L'ATLAS ICEPAC PRÉSENTANT LA SIMULATION GTR POUR LA REQUÊTE : CONCENTRATION PROBABLE A 60% POUR LA SEMAINE 24 (2^E SEMAINE DE JUIN)

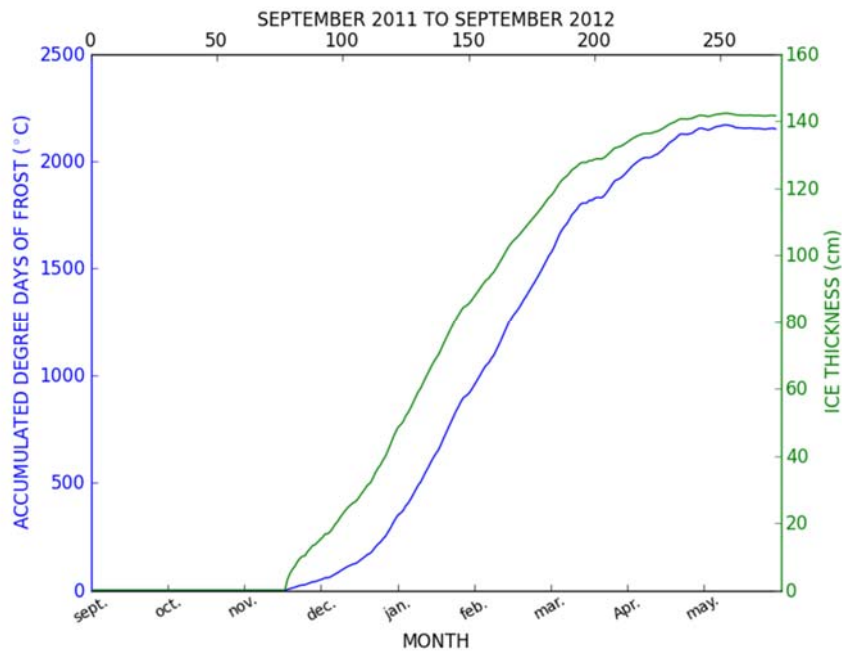


FIGURE 17 : DEGRÉS-JOURS DE GEL (SOUS -1.8°C) ET ÉPAISSEURS SIMULÉES [LEBEDEV, 1938] À UMIUJAQ (2011-2012)

e. Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces de mer

Les modélisations provenant des données de modèles climatiques ont, tout comme pour les données passées, été soumises à trois configurations différentes (NTR, GTR, DTR). Cette fois-ci, de par la nature même des données, il est évident que l'approche GTR est la plus efficace car la tendance est facilement détectable dans toutes les séries. Une tendance a donc été systématiquement retirée à toutes les séries et les ajustements du modèle beta ont été réalisés, selon la même logique que pour le modèle régional, pour tous les pixels.

Des résultats similaires aux résultats obtenus via les requêtes sur le modèle régional sont possibles, car les données utilisées sont des valeurs de concentration (Figure 17).



FIGURE 18: CONCENTRATION PROBABLE À 70% POUR LA SEMAINE #1 EN 2030 (SELON LA TENDANCE)

Au niveau des données auxiliaires, plusieurs analyses ont été réalisées afin d'évaluer le comportement escompté du couvert de glace dans les prochaines années, comme par exemple, une analyse de la durée des saisons d'englacement attendues calculées du mois de septembre de l'an X (minima annuel) jusqu'au mois de septembre de l'an X+1 (Figure 18) ou l'épaisseur estimée pour une communauté et ce selon les différents modèles climatiques utilisés.

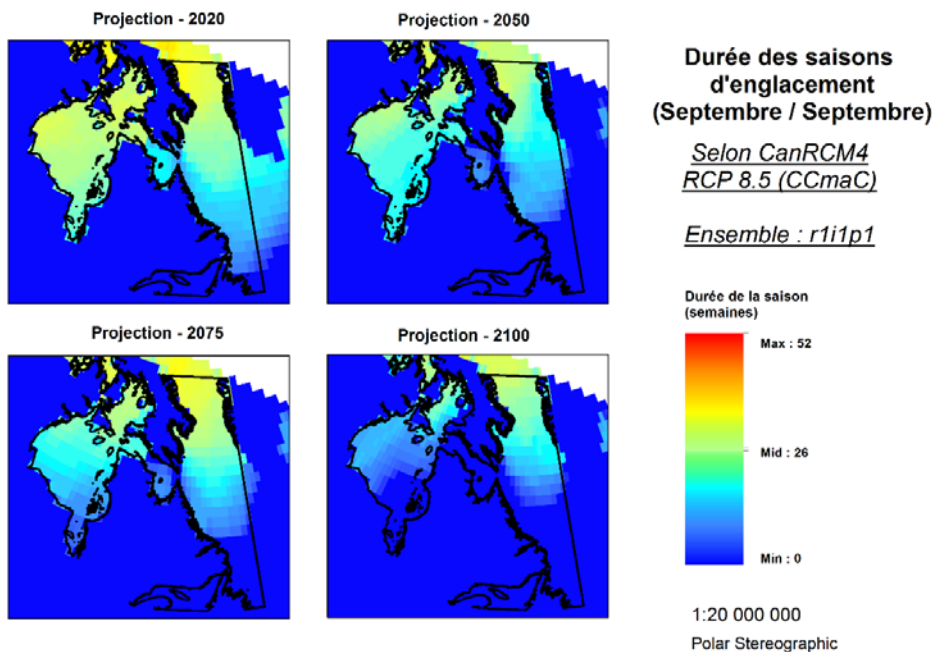


FIGURE 19: DURÉE DES SAISONS D'ENGLACEMENT (>15%) DANS LA BAIE D'HUDSON EN FONCTION DU MODÈLE CANRCM4 RCP85 POUR LES ANNÉES 2020, 2050, 2075 ET 2100.

CONCLUSION

Les analyses réalisées dans le cadre du projet IcePAC permettent d'avoir une perspective complète sur l'évolution passée, présente et future de l'état des glaces dans le complexe d'Hudson.

Ce territoire, se trouvant à la lisière de la zone Arctique, présente des comportements très dynamiques, parfois difficiles à cerner. Grâce aux outils, tant descriptifs que statistiques, disponibles sous IcePAC, les utilisateurs pourront en savoir plus sur la région et mieux comprendre l'évolution spatiotemporelle du couvert de glace et, du même coup, se prémunir face aux risques que cette même glace peut causer aux navires et infrastructures maritimes. Pour être en mesure d'étudier adéquatement cette dynamique complexe, plusieurs outils ont été développés et mis en place lors du projet. :

- Le premier, un modèle probabiliste des concentrations de glace à une échelle de 12.5km (IcePAC-R pour régional) permet aux utilisateurs d'obtenir la probabilité d'une concentration de glace X pour un point donné et ce pour chacune des 52 semaines de l'année.
- Le second outil consiste en un algorithme automatique de cartographie de la présence de glace à une échelle de 250m grâce aux données des capteurs MODIS-Terra et Aqua, nommée IceMap250. À chaque jour, une nouvelle carte de présence des glaces sera produite et rendue disponible sur l'interface pour les utilisateurs, et ce automatiquement.
- Le troisième outil, le modèle IcePAC-L (pour local), permet d'estimer la probabilité de présence de glace locale, à une résolution de 250m, à proximité des communautés situées le long de la côte de la Baie d'Hudson, et ce pour chacune des 52 semaines de l'année.
- Finalement, un dernier outil permet d'obtenir un aperçu futur de la dynamique glacielle grâce à l'application d'une méthode d'analyse fréquentielle sur les données provenant de deux modèles climatiques (CanRCM4 et CCSM4).

Pour les résultats de chacun de ces outils, une série de données descriptives (moyennes, écart-type, etc.) et de données d'analyse (degrés-jours de gel cumulés, épaisseurs de glace simulées empiriquement, stade de croissance simulé) seront rendues disponibles au fur et à mesure qu'elles seront calculées.

Les données, distribuées via une interface cartographique en ligne, seront accessibles facilement et pourront être téléchargées. Cette flexibilité d'utilisation rend l'outil IcePAC d'autant plus intéressant pour les utilisateurs.

L'outil IcePAC s'avère une source d'information qui permettra à ses usagers de prendre des décisions éclairées face à la dynamique spatiotemporelle des glaces dans la région de la Baie d'Hudson et des environs.

RÉFÉRENCES

- Ackerman, S. A., K. I. Strabala, W. P. Menzel, R. A. Frey, C. C. Moeller, and L. E. Gumley (1998), Discriminating clear sky from clouds with MODIS, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 103(D24), 32141-32157.
- Bilello, M. A. (1961), Formation, Growth, and Decay of Sea-Ice in the Canadian Arctic Archipelago, 1961, 14(1), 23, doi:10.14430/arctic3658.
- Cavalieri, D., C. Parkinson, and K. Y. Vinnikov (2003), 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability, *Geophysical Research Letters*, 30(18).
- Caya, D., and R. Laprise (1999), A Semi-Implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM, *Monthly Weather Review*, 127(3), 341-362, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<0341:ASISLR>2.0.CO;2.
- CIS (2013), Sea Ice Climatic Atlas for the Northern Canadian Waters 1981-2010, edited, Ottawa.
- Comiso, J. C. (2012), Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover, *Journal of Climate*, 25(4), 1176-1193.
- Congalton, R. G. (1991), A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46.
- Curry, J. A., J. L. Schramm, and E. E. Ebert (1995), Sea ice-albedo climate feedback mechanism, *Journal of Climate*, 8(2), 240-247.
- Gent, P. R., G. Danabasoglu, L. J. Donner, M. M. Holland, E. C. Hunke, S. R. Jayne, D. M. Lawrence, R. B. Neale, P. J. Rasch, and M. Vertenstein (2011), The community climate system model version 4, *Journal of Climate*, 24(19), 4973-4991.
- Gignac, C. (2012), Utilisation de la télédétection radar haute-résolution pour l'étude du régime glaciaire marin au voisinage des infrastructures maritimes du Nunavik, 107 pp, INRS - Eau Terre Environnement.
- Hall, D. K., G. A. Riggs, V. V. Salomonson, J. Barton, K. Casey, J. Chien, N. DiGirolamo, A. Klein, H. Powell, and A. Tait (2001), Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms, *NASA GSFC*, September.
- Johannessen, O. M., L. Bengtsson, M. W. Miles, S. I. Kuzmina, V. A. Semenov, G. V. Alekseev, A. P. Nagurnyi, V. F. Zakharov, L. P. Bobylev, and L. H. Pettersson (2004), Arctic climate change: Observed and modelled temperature and sea-ice variability, *Tellus A*, 56(4), 328-341.
- Keshri, A. K., A. Shukla, and R. P. Gupta (2008), ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping, *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), 519-524, doi:10.1080/01431160802385459.

Krupnik, I., C. Aporta, S. Gearheard, G. J. Laidler, and L. K. Holm (2010), *SIKU: knowing our ice: documenting Inuit sea ice knowledge and use*, Springer Science & Business Media.

Kwok, R., and N. Untersteiner (2011), The thinning of Arctic sea ice, *Phys. Today*, 64(4), 36-41.

Lasserre, F., and P.-L. Têtu (2015), The cruise tourism industry in the Canadian Arctic: analysis of activities and perceptions of cruise ship operators, *Polar Record*, 51(01), 24-38.

Lebedev, V. (1938), Rost l'da v arkticheskikh rekakh i moriakh v zavisimosti ot otritsatel'nykh temperatur vozdukha, *Problemy Arktiki*, 5, 9-25.

Meier, W. N., F. Fetterer, J. S. Stewart, and S. Helfrich (2015), How do sea-ice concentrations from operational data compare with passive microwave estimates? Implications for improved model evaluations and forecasting, *Annals of Glaciology*, 56(69), 332-340, doi:10.3189/2015AoG69A694.

Moine, M.-P., S. Valcke, B. Lawrence, C. Pascoe, R. Ford, A. Alias, V. Balaji, P. Bentley, G. Devine, and S. Callaghan (2014), Development and exploitation of a controlled vocabulary in support of climate modelling, *Geoscientific Model Development*, 7(2), 479-493.

Ogorodov, S. (2003), The role of sea ice in the coastal zone dynamics of the Arctic Seas, *Water Resources*, 30(5), 509-518.

Parkinson, C. L. (2000), Variability of Arctic sea ice: The view from space, an 18-year record, *Arctic*, 341-358.

Parkinson, C. L., and D. J. Cavalieri (2008), Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006, *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 113(C7).

Pithan, F., and T. Mauritsen (2014), Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models, *Nature Geoscience*.

Riggs, G., D. K. Hall, and J. Key (2001), Initial evaluation of MODIS sea ice observations, paper presented at 58th Eastern Snow Conference, May 15–17, Ottawa.

Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi (2007), ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards, *ECMWF newsletter*, 110(110), 25-35.

Smith, D. (1996), Extraction of winter total sea-ice concentration in the Greenland and Barents Seas from SSM/I data, *Remote Sensing*, 17(13), 2625-2646.

Smith, L. C., and S. R. Stephenson (2013), New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), E1191-E1195.

Spreen, G., L. Kaleschke, and G. Heygster (2005), Operational sea ice remote sensing with AMSR-E 89 GHz channels, paper presented at Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International, IEEE.

Stroeve, J. C., M. C. Serreze, M. M. Holland, J. E. Kay, J. Malanik, and A. P. Barrett (2012), The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climatic Change*, 110(3-4), 1005-1027.

Trishchenko, A. P., Y. Luo, and K. V. Khlopenkov (2006), A method for downscaling MODIS land channels to 250-m spatial resolution using adaptive regression and normalization.

Vuuren, D. P., et al. (2011), The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, 109(1), 5-31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

ANNEXE A

QUESTIONS DU SONDAGE

Le projet IcePac vise à fournir les outils nécessaires aux intervenants et scientifiques du milieu nordique pour **mieux comprendre la dynamique spatiotemporelle du couvert de glace marine**. Le domaine d'application choisi pour la première version d'IcePac est la **Baie d'Hudson** pour laquelle divers produits seront générés et présentés via l'interface cartographique actuellement développée par l'équipe du laboratoire de télédétection de l'INRS-ETE, à Québec.

The IcePac project aims at providing the necessary tools to the stakeholders and scientist of the nordic region in order to get an **improved understanding of sea ice spatiotemporal dynamics**. The study area chosen for this first version of IcePac is the **Hudson Bay** for which different product will be generated and presented through an web mapping interface actually under development by the remote sensing lab team at the INRS in Quebec City.

* 1. Dans quel milieu oeuvrez vous ? /// In what type of structure are you working ?

- Académique /// Academic
- Entreprise privée /// Private sector
- Gouvernement /// Government

* 2. Quel est votre champ d'expertise ? /// What is your field of expertise ?

* 3. Quel usage principal faites-vous de l'information sur les glaces de mer ? /// What is your main use for sea ice information data ?

*** 4. Quels indicateurs sur les conditions de glace aimeriez-vous trouver sur l'interface IcePac ? /// What sea ice state indicators would you like to see on the IcePac interface ?**

- Jour le plus probable d'englacement complet (Probabilité de 100% d'observer 100% de glace) /// Most probable complete freeze-up date (100% probability of having 100% sea ice concentration).
- Jour le plus probable de fonte complète (Probabilité de 100% d'observer 0% de glace) /// Most probable complete melt date (100% probability of having 0% sea ice concentration).
- Durée de la saison d'englacement /// Length of ice season
- Durée de la saison sans glace /// Length of the ice-free season
- Date la plus probable de présence d'un fetch de vent de longueur donnée le long de la côte /// Most probable date for a given length wind fetch along the coast.
- Concentration maximale observée pour une date donnée /// Maximal concentration observed for a given date.
- Concentration minimale observée pour une date donnée /// Minimal concentration observed for a given date.
- Date la plus probable de la première présence de glace /// Most probable first ice presence date
- Date la plus probable de la dernière présence de glace /// Most probable last ice presence date
- Date probable à laquelle les infrastructures maritimes seront libres de glace /// Probable date for which marine infrastructures will be ice free.
- Autre (Spécifiez) /// Other (please specify)

5. Quels types de cartes produites par IcePAC vous seraient le plus utiles ? (1 étant le plus utile, 5 étant le moins utile) /// Which of the IcePAC mapping products will be the most useful to you ? (1 being the most useful, 5 being the less useful)

⋮	<input type="text"/>	Carte journalière de présence de glace a la résolution de 250m /// Daily sea ice presence maps at a 250m resolution
⋮	<input type="text"/>	Carte de probabilité de présence de glace a la résolution 12.5km /// Sea ice presence probability map at 12.5km resolution
⋮	<input type="text"/>	Séries temporelles locales des conditions de glace 1978-2015 /// Local sea ice conditions timeseries 1978-2015
⋮	<input type="text"/>	Carte de probabilité futures de présence de glace basées sur les projections des modèles climatiques a la résolution 40km /// Future Sea ice presence probability map based on climate model projections at 40km resolution
⋮	<input type="text"/>	Image satellitaire MODIS couleurs réelles a la résolution de 250m /// MODIS satellite true color images at a 250m resolution

6. Entrez vos informations si vous souhaitez être tenu au courant des développements d'IcePAC. /// Enter your info if you want to stay up to date on the last developments of IcePAC.

Nom // Name

Pays // Country

Courriel // Email

7. Laissez-nous vos commentaires, suggestions et idées pour le développement d'IcePAC. /// Leave us comments, suggestions and ideas to develop IcePAC.

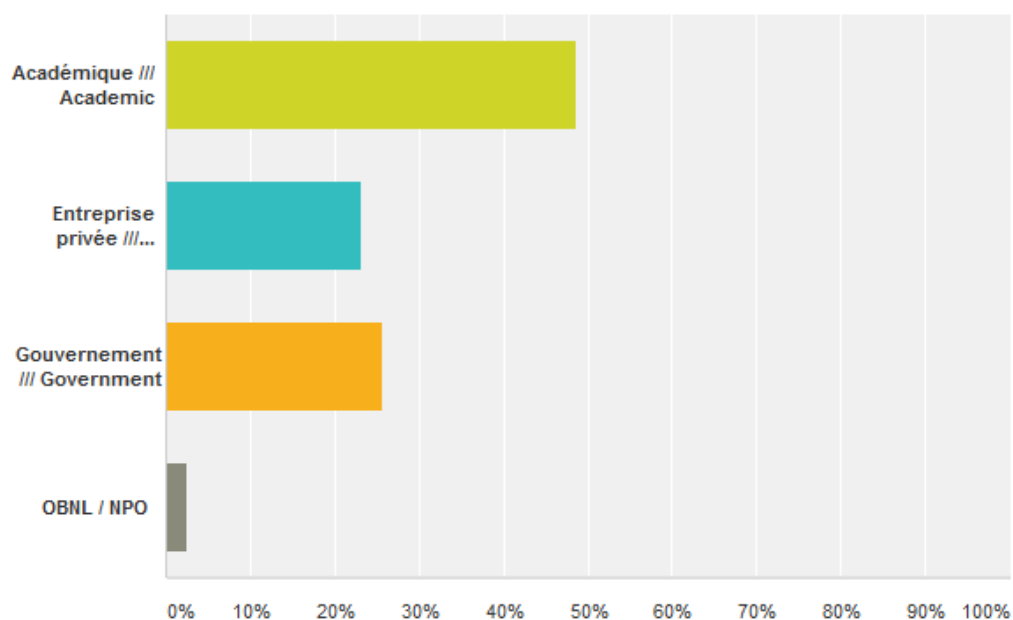
ANNEXE B

RÉPONSES AU SONDAGE

Réponses à la question 1

Dans quel milieu oeuvrez vous ? /// In what type of structure are you working ?

Answered: 39 Skipped: 0



Answer Choices	Responses
Académique /// Academic	48.72% 19
Entreprise privée /// Private sector	23.08% 9
Gouvernement /// Government	25.64% 10
OBNL / NPO	2.56% 1
Total	39

Réponses à la question 2

Quel est votre champ d'expertise ?

1. Oceanography and Arctic studies
2. nunavik: natural environment & wildlife
3. Freshwater runoff effect on sea ice in Hudson Bay
4. maritime traffic and risk analysis
5. Transportation (Policy, planning and programming)
 6. Écologie
 7. Marine Shipping
 8. energy and environmental policy
9. Marine Captain - Icebreakers - Beaufort, N/W Pass, & Hudson Bay
10. Climate change impact and vulnerability assessment
 11. Icebreaking and winternavigation
 12. Ice management
 13. ice island drift and deterioration
 14. Arctic Ice Master
 15. Hydrodynamique côtière
16. Hydrologie et changements climatiques
17. sea ice forecasting and climatology
18. (Paléo)limnologie, géographie physique, érosion côtière
19. Océanographie - interaction glace - pétrole - sédiments
 20. Géomorphologie littorale
 21. naval architect
 22. Coordination de science nordique
 23. écologie végétale
24. Hydrologie/Gestion intégrée de l'eau/Changements climatiques
 25. snow, polar atmospheric chemistry
 26. Biologie
 27. Limnology
28. Changement climatique des environnements nordiques
 29. Geography
 30. Remote sensing and sea ice modelling
31. ice engineering/ice mechanics and properties
 32. biochemistry
33. Physical Oceanography and numerical modelling
 34. Hydraulique fluvial et maritime
35. transportation environmental policy - climate change emissions adaptation etc
 36. Télédétection de la couleur de l'eau
 37. économique/politique
38. Marine management; Arctic shipping
 39. Télédétection

Réponses à la question 3

Quel usage principal faites-vous de l'information sur les glaces de mer ?

1. applied research in support of offshore development and shipping
2. marine mammals & traditional hunting practices
3. Analyse time series of freeze up and breakup dates (over and under 80% of ice concentration), and ice thickness.
4. impact on shipping (delays, incidents, route planning, schedule planning)
5. Planning for the Churchill Gateway development including expanding the shoulder periods of the shipping season. Input for future regulation "adjustments". Ice road planning for Churchill-Kivalliq traffic.
6. Facteur influençant la phénologie et le succès de reproduction de la faune arctique
7. Route planning, project assessments
8. anticipating need for policy decisions or changes in policies
9. Vessel and cargo delivery in the Arctic
10. Statistical analysis of sea ice cover and wind fetch over the Hudson bay and strait for infrastructure vulnerability assessment
11. Managing icebreaking in Baltic Sea
12. planning what ice management will be required for a project and loads on structures
13. as ancillary information for ice island models
14. Arctic marine operations
15. Période d'activité des vagues sur les infrastructures
16. usage dynamique en vue d'adapter les pratiques et processus décisionnels
17. to understand the main drivers of trends and variability to improve prediction on all time-scales
18. aucune pour l'instant
19. Analyses de données, modélisation, etc
20. Etudier l'impact des glaces de mer sur les côtes du Nunavik.
21. analysis of operations and requirements for ice-capable ships
22. logistique, partage d'information avec autres utilisateurs
23. aucun
24. Aucun jusqu'ici
25. sea ice coverage
26. Vulgarisation scientifique
27. paleoclimate information
28. Synthèses des connaissances sur le climat arctic
29. Impacts of changing ice conditions on coastal environmentments
30. Ice charting and ship routing.
31. Determination of ice loads on offshore structures/vessels
32. analysis
33. Model evaluation, as well as ocean/sea-ice response to a changing climate
34. Modélisation des vagues (ouvertures) et forces
35. feasibility of expanded shipping, trade, marine traffic, environmental impact etc.
36. Pour la modélisation de la production primaire et pour la correction des images optiques
37. dissémination - informe les politiques publiques
38. Evaluating risks to and from ships
39. Cartographie

Réponses à la question 4

Quels indicateurs sur les conditions de glace aimeriez-vous trouver sur l'interface IcePac ?

Answer Choices	Responses
▼ Jour le plus probable d'englacement complet (Probabilité de 100% d'observer 100% de glace) /// Most probable complete freeze-up date (100% probability of having 100% sea ice concentration).	56.41% 22
▼ Jour le plus probable de fonte complète (Probabilité de 100% d'observer 0% de glace) /// Most probable complete melt date (100% probability of having 0% sea ice concentration).	53.85% 21
▼ Durée de la saison d'englacement /// Length of ice season	69.23% 27
▼ Durée de la saison sans glace /// Length of the ice-free season	71.79% 28
▼ Date la plus probable de présence d'un fetch de vent de longueur donnée le long de la côte /// Most probable date for a given length wind fetch along the coast.	33.33% 13
▼ Concentration maximale observée pour une date donnée /// Maximal concentration observed for a given date.	51.28% 20
▼ Concentration minimale observée pour une date donnée /// Minimal concentration observed for a given date.	41.03% 16
▼ Date la plus probable de la première présence de glace /// Most probable first ice presence date	66.67% 26
▼ Date la plus probable de la dernière présence de glace /// Most probable last ice presence date	66.67% 26
▼ Date probable à laquelle les infrastructures maritimes seront libres de glace /// Probable date for which marine infrastructures will be ice free.	53.85% 21

Autres réponses :

Any information on the type of ice that could be provided, such as the stage of development (WMO egg code).

ice egg info

Does this zone include monitoring Hudson Strait? Need that info as it can control Bay non-regulatory navigation dates.

Kind of Ice and related concentrations

the amount of ice at any given time (as per CIS charts)

Épaisseur, date la plus probable ou l'infrastructure sera à risque durant le régime des glaces

all of the above plus information on ice pressure intensity and duration, probable ice strength/decay

Durée de présence de glace sur les côtes

time series of sea ice coverage

motion (velocity), thickness

Encore trop d'inconnu sur la relation : concentration de glace vs vagues, mais date vs concentration donnée

probability and regional geographical location including Hudson Bay of extreme arctic weather events

la concentration de glace journalière

Réponses à la question 5

Quels types de cartes produites par IcePAC vous seraient le plus utiles ? (1 étant le plus utile, 5 étant le moins utile)

	1	2	3	4	5	Total	Score
Carte journalière de présence de glace à la résolution de 250m	33.33% 9	11.11% 3	14.81% 4	22.22% 6	18.52% 5	27	3.19
Carte de probabilité de présence de glace à la résolution 12.5km	24.14% 7	27.59% 8	27.59% 8	13.79% 4	6.90% 2	29	3.48
Séries temporelles locales des conditions de glace 1978-2015	26.67% 8	30.00% 9	10.00% 3	20.00% 6	13.33% 4	30	3.37
Carte de probabilité futures de présence de glace basées sur les projections des modèles climatiques à la résolution 40km	22.86% 8	22.86% 8	25.71% 9	11.43% 4	17.14% 6	35	3.23
Image satellitaire MODIS couleurs réelles à la résolution de 250m	12.12% 4	9.09% 3	21.21% 7	24.24% 8	33.33% 11	33	2.42

Réponses à la question 6

Les réponses à la question 6 resteront confidentielles car il s'agit de données de contact (Nom, Courriels, etc...)

Réponses à la question 7

Laissez-nous vos commentaires, suggestions et idées pour le développement d'IcePAC.

This type of sea-ice information product would be very useful.

Good luck with this interesting project

Keep up the surveys for development

Les réponses en 5 seront variables en raison des différents usagers et champs d'intervention sur le territoire
Je pense que cela n'est pas possible actuellement, mais des données de l'épaisseur des glaces me seraient aussi utiles.

Concentration is an important parameter but for risk/economic analysis (such as ship trafficability) thickness and strength are more important.

illustrate correlate the ice projections with GHG concentrations

Important que les produits soient distribués dans un format couramment utilisé, voire en plusieurs formats;

Important que les observations satellitaires soient disponibles en quasi-temps réel pour la gestion des risques côtiers;

ANNEXE C

GUIDE DE L'USAGER POUR L'INTERFACE ICEPAC

GUIDE D'UTILISATEUR

ICEPAC, V. 1

Ce guide vous présente les diverses fonctions disponibles au sein de l'interface IcePAC.

<http://icepac.ete.inrs.ca>

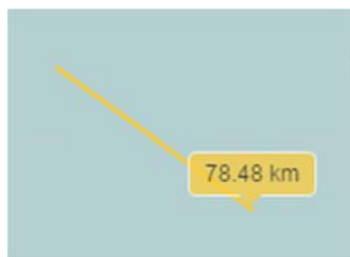
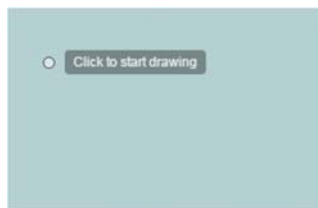
Cette interface a été développée sous plateforme OpenLayers et les données sont entreposées via GeoServer.

OUTILS (Tools)

Measure (Règle)



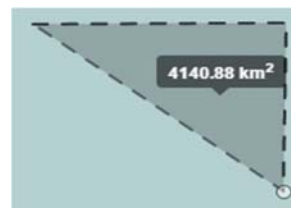
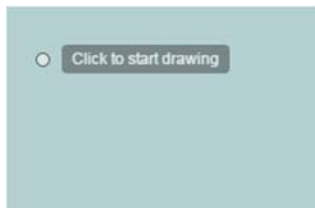
Cet outil sert à calculer la distance entre deux ou plusieurs points. Pour cesser la création de points de référence, il suffit de double-cliquer lorsque vous créez votre dernier point.



Section



Cet outil sert à mesurer la superficie d'une zone dessinée par l'utilisateur. Pour créer cette zone, il suffit de créer des points de référence qui serviront de coins au polygone. Pour arrêter la création de la zone, il suffit de double-cliquer lorsque vous créez votre dernier point. L'outil joindra alors le dernier nœud dessiné avec le premier nœud dessiné.



Clear (effacer)

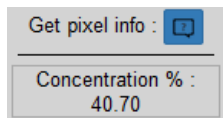
Cet outil sert à effacer les traces de l'outil *Measure* et *Section*.

Opacity (Opacité)

Cet outil permet de changer l'opacité d'une carte pour pouvoir voir à travers. Par défaut, l'opacité est à 1, soit une opacité totale.

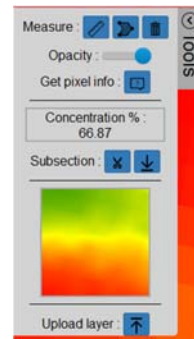
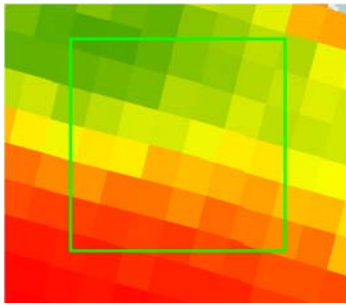
Get pixel info (information sur le pixel)

Cet outil permet d'obtenir les informations d'un pixel présent sur la couche d'information ouverte par l'utilisateur. L'utilisateur doit d'abord cliquer sur l'icône et ensuite sur le pixel désiré.



Subsection (sous-section)

Cet outil sert à sélectionner une zone désirée pour pouvoir l'enregistrer par la suite. L'utilisateur doit d'abord définir la zone à « découper » avec l'outil ciseau. Ensuite, une fois la zone choisie, il suffit de cliquer sur l'icône flèche pour procéder au téléchargement en format GeoTIFF, une norme ad hoc du marché géospatial. Prenez note que le rendu dans la zone d'aperçu subit une interpolation bilinéaire, donnant un aspect lissé à l'image mais que l'image produite n'est pas lissée.

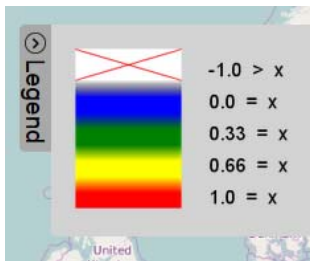


Upload layer (Proposer une couche d'information) ↑

Cet outil permet aux utilisateurs d'importer dans le système IceMAP leurs propres couches d'information afin de les rendre disponibles à toute la communauté. Avant de voir leur couche mise en ligne, la couche d'information devra être approuvée par le/la gestionnaire du site et intégrée à GeoServer.

Legend

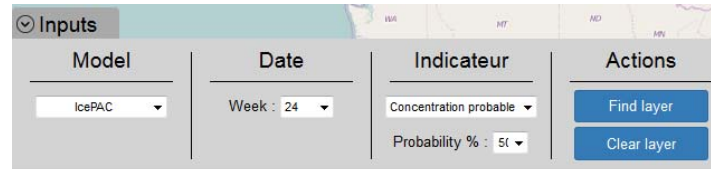
Cet onglet permet d'afficher la légende prédéfinie pour la couche de données ouverte par l'utilisateur.



ENTRÉES (Input)

IcePAC

Définition : Les couches d'information sous le nom IcePAC correspondent aux simulations menées à partir des données historiques de concentration de glace de L'OSI-SAF. Les données sont exploitées afin d'en tirer deux indicateurs, soit la probabilité d'occurrence d'une concentration X, ou la concentration attendue pour une probabilité P. Afin de minimiser le temps de calcul, des simulations à des pas de 5% ont été réalisées pour chacun des deux indicateurs.

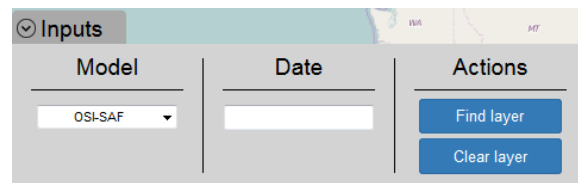


The screenshot shows a web interface for the IcePAC model. It features a header 'Inputs' with a dropdown arrow. Below the header, there are four columns: 'Model', 'Date', 'Indicateur', and 'Actions'. The 'Model' column has a dropdown menu with 'IcePAC' selected. The 'Date' column has a text input field containing 'Week : 24'. The 'Indicateur' column has two dropdown menus: 'Concentration probable' and 'Probability % : 5%'. The 'Actions' column contains two blue buttons: 'Find layer' and 'Clear layer'.

Pour afficher une couche d'information, l'utilisateur doit spécifier pour quelle semaine de l'année (1-52) l'information est désirée. Ensuite, il faut spécifier pour quel indicateur et pour quelle valeur de pourcentage (par tranche de 5%) l'on souhaite obtenir l'information.

OSI-SAF

Définition : Les couches d'information sous le nom OSI-SAF regroupent les données de concentrations micro-ondes passives générées par EUMETSAT. La donnée, préalablement découpée sur la zone de la Baie d'Hudson, est fournie à un pas journalier de la fin février 1981 à la mi-avril 2015.



The screenshot shows a web interface for the OSI-SAF model. It features a header 'Inputs' with a dropdown arrow. Below the header, there are three columns: 'Model', 'Date', and 'Actions'. The 'Model' column has a dropdown menu with 'OSI-SAF' selected. The 'Date' column has an empty text input field. The 'Actions' column contains two blue buttons: 'Find layer' and 'Clear layer'.

Pour afficher une couche d'information, l'utilisateur doit spécifier pour quelle date il souhaite voir les concentrations de glace estimée via satellite. Si une date s'avère indisponible, elle n'apparaîtra pas en grisée dans le calendrier.

Image MODIS 250m

Définition : Les images en composé-couleur réelle de MODIS (bandes 1,4,3) à la résolution désagrégée de 250m.

Model	Date	Actions
Image MODIS 250m	2012-02-14 16:45	Find layer Clear layer

Pour afficher une couche d'information, l'utilisateur doit spécifier pour quelle date il souhaite voir l'image MODIS en couleur réelle et ensuite, l'heure de la scène désirée.

Composite (Daily)

Définition : Les cartes de présence de glace produites à partir de l'algorithme IceMap250.

Pour afficher une carte, l'utilisateur choisit une date entre 1978 et 2015, car ce sont des données journalières. Ensuite, il s'agit de cliquer sur « Find layer » pour l'affichage et pour effacer la carte il suffit de cliquer sur « Clear layer ».

Model	Date	Actions
Composite (Daily)	2012-02-14	Find layer Clear layer

Pour afficher une couche d'information, l'utilisateur doit spécifier pour quelle date il souhaite voir les concentrations de glace estimées via IceMap250. Si une date s'avère indisponible, elle n'apparaîtra pas en grisée dans le calendrier.